
Opdrachtgever: Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater

Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein

Eindrapport

juli 2004

Colofon

De voorliggende rapportage is geschreven in opdracht van de Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater met financiële steun van het Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz van de Duitse deelstaat Nordrhein-Westfalen, het Nederlandse Ministerie van Verkeer en Waterstaat, de Provincie Gelderland in Nederland en de Europese Unie (Interreg IIIB NWE)

Uitgevers:	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Schwannstraße 3 40476 Düsseldorf Provincie Gelderland Postbus 9090 6800 GX Arnhem Ministerie van Verkeer en Waterstaat Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland Postbus 9070 6800 ED Arnhem
Auteur:	Dr.-Ing. R. Lammersen
Leden van de Duits-Nederlandse werkgroep Hoogwater	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Staatskanzlei Nordrhein-Westfalen Bezirksregierung Düsseldorf Staatliches Umweltamt Krefeld Arbeitskreis der Deichpflichtigen im Regierungsbezirk Düsseldorf Provincie Gelderland Ministerie van Verkeer en Waterstaat Waterschap Rivierenland Vereniging Nederlandse Riviergemeenten
ISBN:	9036956390
Informatiediensten:	http://www.munlv.nrw.de http://www.gelderland.nl http://www.minvenw.nl
Distributie:	Exemplaren zijn verkrijgbaar bij de bovengenoemde uitgevers. Er bestaat ook een Duitse uitgave van dit rapport met de titel: Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein (ISBN 9036956382).

Inhoudsopgave

Samenvatting	1
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Doelstelling	10
1.3 Aanpak van het project	11
1.4 Organisatie van het project	13
2 Onderzoeksgebied	15
2.1 Definitie onderzoeksgebied en studiegebied	15
2.2 Hydrologie	16
2.3 Hoogwaterbescherming en afvoercapaciteit	19
2.3.1 Definitie maatgevende afvoer, afvoervermogen en afvoercapaciteit	19
2.3.2 Huidige toestand in het onderzoeksgebied: een overzicht	19
2.3.3 Huidige en toekomstige toestand in het studiegebied	21
2.3.4 Toekomstige toestand in het onderzoeksgebied stroomopwaarts van NRW	25
2.4 Hoogwaterreducerende maatregelen	26
2.4.1 Hoogwaterreducerende maatregelen in het stroomgebied tot Andernach	26
2.4.2 Hoogwaterreducerende maatregelen langs de Niederrhein	27
2.4.3 Hoogwaterreducerende maatregelen in Nederland	28
3 Methode	31
3.1 Modelling extreme afvoeren uit het stroomgebied van de Rijn	31
3.2 Selecteren geschikte afvoergolven	33
3.3 Overstromingen op de Niederrhein	34
3.3.1 2D-modelling van overstromingen op de Niederrhein	34
3.3.2 Modelling overstromingen op de Niederrhein in een 1D-model	36
3.4 1D-modelling van de afvoer in het studiegebied rekening houdend met overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen	38
4 Extreme afvoeren uit het stroomgebied van de Rijn	41
4.1 Extreme neerslagen leiden tot extreme afvoeren	41
4.2 Het effect van dijkoverstromingen en retentiemaatregelen op de Oberrhein	42
4.3 Selecteren van geschikte afvoergolven	44
4.4 Hoe extreem zijn de extreme hoogwaters?	46
5 Overstromingen op de Niederrhein en in Gelderland	49
5.1 Overstromingsscenario's	49
5.2 Door overstromingen getroffen Gebieden langs de Niederrhein	50
5.2.1 Resultaten van de 2D-berekeningen	50
5.2.2 Resultaten van de 1D-berekeningen	51
5.3 Dynamiek van de overstromingen	53
6 Effect van overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen op de topafvoeren en topwaterstanden van de Rijn	57
6.1 Inleiding	57
6.2 Ontwikkeling van de topafvoer van de Rijn	57
6.2.1 Effect van de overstromingen op de afvoer van de Rijn	57
6.2.2 Effect van de overstromingen en de hoogwaterreducerende maatregelen op de afvoer in de Rijn bij verschillende hoogwaters	60

6.3	Effect van de hoogwaterreducerende maatregelen op de waterstanden in de Rijn	64
6.3.1	Inleiding	64
6.3.2	Effect van de reeds gerealiseerde maatregelen (toestand 2002)	64
6.3.3	Effect van de in NRW geplande maatregelen (zonder maatregelen in Nederland)	65
6.3.4	Optimaliseren van de in NRW geplande maatregelen („NRWMAX-variant“)	67
6.3.5	Effect van de Nederlandse maatregelen	68
6.3.6	Grensoverschrijdend effect van alle geplande maatregelen (NRW en NL)	68
6.4	Relatie met het Actieplan Hoogwater van de ICBR	70
6.5	Samenvatting en conclusies	72
7	Afvoerverloop en duur van een hoogwater	75
8	Geborgen watervolumes	77
9	Wat gebeurt er als de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn nog extremer wordt?	81
9.1	Inleiding	81
9.2	Effect van een eventuele klimaatverandering op de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn	81
9.2.1	Mondiale klimaatverandering	81
9.2.2	Reeds waargenomen variabiliteit van hydrometeorologische en hydrologische grootheden in het stroomgebied van de Rijn	82
9.2.3	Effect mondiale klimaatverandering op het stroomgebied van de Rijn	83
9.3	Overstromingen op de Niederrhein bij nog extremere afvoeren	85
9.4	Topafvoeren bij nog extremere afvoeren	87
10	Afvoercapaciteit en kritieke afvoer	89
11	Nauwkeurigheid van de resultaten	91
11.1	Opmerking vooraf	91
11.2	Nauwkeurigheid van de berekende afvoeren bij Andernach	91
11.2.1	Het gebruik van verschillende modellen	91
11.2.2	Vereenvoudigde aanpak voor de berekening van overstromingen op de Oberrhein	92
11.3	Effect veranderde afvoer bij Andernach op de verdere resultaten voor de Niederrhein en de Rijntakken	93
11.4	Effect veranderde afvoeren uit de zijrivieren	93
11.5	Effect niet meerekenen van het grondwater	94
11.6	Effect eventuele stijging van de zeespiegel	94
11.7	Effect morfologische ontwikkeling van het zomerbed	94
11.8	Effect uitgangspunt dijkoverstroming met of zonder dijkdoorbraak	95
11.8.1	Omvang van de overstromingen	95
11.8.2	Afvoeren in de Rijn	97
11.9	Vergelijking van de topafvoeren in de Rijn (2D- en 1D-berekeningen)	98
11.10	Samenvatting en conclusies	99
12	Conclusies en toekomstperspectief	101
12.1	Conclusies	101
12.2	Toekomstperspectief	103
13	Literatuur	105
	Bijlagen	107

Figurenlijst

Figuur 1-1: Projectaanpak	11
Figuur 2-1: Onderzoeksgebied en studiegebied (volgens LUA, 2002).....	15
Figuur 2-2: Hoogwatergenese op de Rijn tussen Rheinfelden en Lobith.	18
Figuur 2-3: De huidige hoogwaterbescherming langs de Rijn; stand van zaken per 1993 (volgens Eberle et al, 2004) (definitie afvoervermogen zie tekst).	20
Figuur 2-4: Maatregeltypen in het kader van „Ruimte voor de Rivier“ in Nederland (bron: Silva et al., 2000).	29
Figuur 3-1: Aanpak bij de schatting van extreme afvoeren uit het stroomgebied.	31
Figuur 3-2: 2D-overstromingsmodel Delft-FLS, situatie- en hoogtemodel (bron: Gudden, 2004).....	35
Figuur 3-3: Indeling van de overstromingsgebieden achter de dijken en van locaties waar de overstromingen van de waterkeringen respectievelijk een dijkdoorbraak werden berekend (volgens Gudden, 2004).	37
Figuur 4-1: Frequentieverdeling voor de maximale 10-daagse sommen van de winterneerslagen voor gemeten en gegenereerde neerslagen (gemiddelde waarde van de neerslagen bij 34 meetstations in het Rijngebied). Bron: Eberle et al. (2004).	41
Figuur 4-2: Jaarmaximum van duizend jaar gesimuleerde afvoer bij het meetstation Andernach aan de Rijn.	42
Figuur 4-3: Golfvormen van de uitgekozen afvoergolven bij Andernach (systeemtoestand OR-2002 mit).....	45
Figuur 4-4: Genese van de uitgekozen extreme situaties (volgens Eberle et al., 2004).....	45
Figuur 4-5: Vergelijking van hoogwatertoppen met statistische waarden.	47
Figuur 5-1: Gebieden langs de Niederrhein waar bij de genoemde hoogwaters overstromingen kunnen ontstaan. Resultaten DSS, scenario 1995_M en 2020_M.....	52
Figuur 5-2: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 1995_DB HW824mitDueb, kwalitatieve gegevens.	54
Figuur 5-3: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 2020_DB HW824mitDueb, kwalitatieve gegevens.	55
Figuur 6-1: Langsprofiel topafvoeren in de Rijn: boven: toestand 1995/2002 zonder hoogwaterreducerende maatregelen onder: toestand 2020 zonder hoogwaterreducerende maatregelen.	59
Figuur 6-2: Vergelijking tussen hoogwatertoppen met statistische waarden. ..	63
Figuur 6-3: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Huidige toestand (verschil scenario 2002_NRW_M – 1995_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).	64
Figuur 6-4: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Geplande toestand 2020 in alleen NRW (verschil scenario 2020_NRW_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	66
Figuur 6-5: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Geoptimaliseerde toestand 2020 alleen in NRW (verschil scenario 2020_NRWMAX_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	67

Figuur 6-6: Het effect van de geplande maatregelen op de topwaterstanden, geplande maatregelen in Nederland (verschil scenario 2020_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	68
Figuur 6-7: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden, geplande toestand 2020 NRW en NL (verschil scenario 2020_NRW_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	69
Figuur 6-8: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden, geoptimaliseerde toestand 2020 NRW en NL (verschil scenario 2020_NRWMAX_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	69
Figuur 6-9: Dijkhoogte en topwaterstanden in het gebied dicht bij de grens, HW824.	70
Figuur 6-10: Verandering van de topwaterstand in het lengteprofiel. Geplande toestand in NRW tegenover toestand 1995 (verschil scenario 2020_NRW_M – 1995_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).....	72
Figuur 7-1: Effect van de overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen op de afvoergolf (HW824).	76
Figuur 8-1: Achter de dijken en in de retentiepolders opgevangen waterhoeveelheden en het watervolume dat in zijn totaliteit ter beschikking staat. Scenario 2020-NRW_NL-M, bij de vijf hoogste hoogwaters HW841, HW719 HW036, HW158 en HW824 (zie ook Figuur 8–1 vervolg).	77
Figuur 9-1: Voorspelde trends ten aanzien van de luchttemperatuur gebaseerd op verschillende emissiescenario's (figuur rechts) en berekeningen met verschillende GCM's (IPCC, 2001).	82
Figuur 9-2: Verandering van het afvoerregime langs de Rijn bij een temperatuurstijging van 2°C. De werkelijke toestand is met blauw aangegeven, het scenario met rood (Kleinn, 2002).	84
Figuur 9-3: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 2020_DB HW158ohneDueb, kwalitatieve gegevens.	86
Figuur 9-4: Ontwikkeling van de topafvoer langs de Rijn. Nog extremer hoogwater HW158ohneDueb.	88
Figuur 10-1: Kritieke afvoeren en de op basis van de maatgevende afvoer geraamde afvoercapaciteit (toestand 2020).	90
Figuur 11-1: Morfologische ontwikkeling van het zomerbed van de Rijn (bron: Silva et al., 2001).....	94

Tabellenlijst

Tabel 2-1: Belangrijke zijrivieren van de Rijn en enkele kengetallen bij de meetstations (bron: Eberle et al., 2004).	16
Tabel 2-2: Gemiddelde langjarige hoogwaterafvoeren (MHQ) voor de winter- en zomerhalfjaren bij de meetstations van de Rijn (bron: LUA, 2002).	17
Tabel 2-3: Maatgevende afvoeren in NRW en Gelderland, geplande toestand in 2020 (volgens MUNLV-NRW 2003).	22
Tabel 2-4: Globaal geraamde afvoercapaciteiten in NRW en Gelderland, huidige toestand van 2002; theoretische waarden uitgaande van de aanname dat BHQ ₇₇ met de genoemde waakhoogten wordt gerealiseerd.	25
Tabel 2-5: Globaal geraamde afvoercapaciteiten in NRW en Gelderland, geplande toestand in 2020, theoretische waarden na realisering van het nagestreefde beschermingsniveau met de vermelde waakhoogten.	25
Tabel 2-6: Retentiemaatregelen op de Oberrhein (vergelijk ook Bijlage 2-1 en Bijlage 2-2) (volgens Eberle et al., 2004).	26
Tabel 2-7: Retentiemaatregelen op de Niederrhein (vergelijk ook Bijlage 2-3) (volgens Van der Veen et al., 2004a en Mehlig, 2004).	27
Tabel 3-1: Berekende systeemtoestanden op de Oberrhein.	32
Tabel 3-2: Bij het selecteren van de afvoergolven geschatte effectbereik van de hoogwaterreducerende maatregelen.	33
Tabel 3-3: Systeemtoestanden op de Niederrhein voor de berekening van de overstromingen.	34
Tabel 3-4: Scenario's voor de 2D-overstromingsberekeningen Niederrhein.	36
Tabel 3-5: Scenario's voor de berekeningen in DSS (respectievelijk in 1D-SOBK).	40
Tabel 4-1: Topafvoeren van de 16 gegenereerde hoogste hoogwaters. Alle berekeningen zijn zonder dijkoverstroming op de Niederrhein.	43
Tabel 4-2: Effect van dijkoverstromingen en retentiemaatregelen op de Oberrhein op de topafvoeren van de extreme hoogwaters bij Andernach en Lobith. Alle berekeningen zijn gemaakt zonder dijkoverstroming op de Niederrhein.	44
Tabel 4-3: Uitgekozen afvoergolven (bron: Van der Veen et al., 2004a). Het hoogwater MET95 is het historische hoogwater van januari 1995.	44
Tabel 5-1: Chronologie bij de overstroming van afzonderlijke gebieden. Hoogwatersituatie HW824, scenario 1995_DB en scenario 2020_DB (volgens Gudden, 2004).	53
Tabel 9-1: Topwaarden van nog extremere afvoeren bij de meetstations langs de Niederrhein.	87
Tabel 11-1: Verschillende resultaten door verschillende modellen. Alle berekeningen zonder dijkoverstroming op de Oberrhein en de Niederrhein.	92
Tabel 11-2: Topafvoeren tussen de dijken; berekeningen Delft-FLS met en zonder dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstroming op de Niederrhein (bron: Gudden, 2004).	98
Tabel 11-3: Topafvoeren tussen de dijken; berekeningen Delft-FLS en SOBK/DSS.	98

Bijlagenlijst

Bijlage 1: Dijkhoogten en hoogwaterafvoeren van vastgestelde herhalingsfrequenties in het studiegebied	109
Bijlage 2: Waterstandreducerende maatregelen	119
Bijlage 3: Schematisering van het gebied achter de dijken in SOBEK/DSS	123
Bijlage 4: Resultaten overstromingsberekeningen	127
Bijlage 5: Langsprofielen topafvoeren	149
Bijlage 6: Topafvoeren bij de meetstations aan de Niederrhein	155

Samenvatting

Doelstelling

In opdracht van de Duits-Nederlandse werkgroep hoogwater is vanaf 2002 tot 2004 door de provincie Gelderland, het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), het Landesumweltamt NRW (LUA NRW) en de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) het onderzoek "Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein" uitgevoerd.

Hoofdvragen van dit onderzoek zijn:

- Hoeveel water kan onder extreme omstandigheden uit het stroomgebied van de Rijn worden verwacht?
- Hoeveel water kan tussen de dijken via de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken worden afgevoerd? Waar vinden dijkoverstromingen plaats en wat zijn de effecten op de hoogwatergolven?
- Wat gebeurt er, als het water niet tussen de dijken kan worden afgevoerd? Welke binnendijkse gebieden overstromen? Zijn er grensoverschrijdende overstromingen mogelijk?
- Wat zijn de effecten van hoogwaterverlagende maatregelen?

De gehanteerde uitgangspunten zijn:

- De huidige toestand van de dijken (1995, 2002) en de toestand in 2020, na afronding van de lopende dijkverbeteringen in NRW,
- De op de Oberrhein, de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken reeds uitgevoerde of geplande maatregelen ter vermindering van hoogwater voor het jaar 2002 en 2020, en
- Het huidige klimaat en het effect van klimaatverandering

Methodiek

Kort samengevat zijn de volgende stappen gezet:

- Vaststellen van extreme afvoeren uit het Rijnstroomgebied bij Andernach
- Uitvoeren van overstromingsberekeningen langs de Niederrhein en in Gelderland
- Vaststellen van de effecten van dijkoverstromingen en hoogwaterverlagende maatregelen op de waterstand en de afvoer in de rivier
- Inschatting van het effect van klimaatverandering.

1. Vaststellen van extreme afvoeren uit het Rijnstroomgebied bij Andernach

Op basis van 30 jaar meteorologische gegevens voor het Rijnstroomgebied zijn met behulp van een resampling-techniek 1000 jaar neerslag en temperatuur met vergelijkbare statistische eigenschappen gegenereerd.

Met behulp van een neerslag-afvoermodel zijn deze 1000 jaar neerslag getransformeerd in 1000 jaar afvoer bij verschillende meetpunten langs de Rijn. Uit deze verkregen reeks zijn de 16 hoogste hoogwaters voor de Niederrhein geïdentificeerd voor verdere analyse in deze studie.

Rekening houdend met de afvoer op de zijrivieren zijn voor deze extreme hoogwaters ééndimensionale berekeningen van de waterbeweging op de Rijn vanaf Basel tot Andernach uitgevoerd. Bij de eerste berekeningen zijn de dijkoverstromingen op de Oberrhein niet meegenomen. Op deze manier is het mogelijk inzicht te krijgen in de beschikbare hoeveelheid water die op basis van de gegeven neerslag vanuit het stroomgebied bij Andernach kan komen, zonder te kijken, of dit water door het bestaande hydraulische systeem verwerkt kan worden.

Om een realistische verandering van de golfvorm bij Andernach te bepalen zijn de berekeningen opnieuw uitgevoerd. Hierbij zijn dijkoverstromingen en waterstandsverlagende maatregelen langs de Oberrhein meegenomen.

2. Uitvoeren van overstromingsberekeningen voor de Niederrhein en Gelderland

Op basis van de volgens deze methode berekende twee meest extreme hoogwatergolven bij Andernach en de bijbehorende afvoergolven van de zijrivieren van de Rijn zijn met het twee-dimensionale model Delft-FLS overstromingsberekeningen voor de Rijn vanaf Rijn-km 642 (Nonnenwerth bij Bad Honnef) uitgevoerd. Aan de hand hiervan kunnen uitspraken worden gedaan over plaats, tijdstip en duur van het overstromen van waterkeringen en het binnendijkse stromingspatroon van de overstromingen.

Randvoorwaarden voor deze modelberekeningen zijn:

- Dijkoverstromingen vinden alleen plaats als de waterstand in de rivier de kruinhoogte van de waterkering overschrijdt.
- Op het moment dat de kruinhoogte wordt overschreden, vindt een dijkdoorbraak plaats. Andere waterkeringen (muren etc.) blijven staan en overstromen slechts.
- Andere faalmechanismen zijn niet meegenomen.

3. Vaststellen van de effecten van dijkoverstromingen en hoogwaterverlagende maatregelen op waterstand en afvoer in de rivier

Verder zijn voor de Rijn vanaf Andernach tot aan de Nederlandse Rijntakken berekeningen met het ééndimensionale model SOBEK uitgevoerd. Van de 16 bovengenoemde hoogwaters zijn hiervoor de twee hoogste hoogwatergolven en 6 andere hoogwatergolven gekozen, die hoger zijn dan het hoogwater van 1995, in het bereik van de inzet van de maatregelen liggen en vergelijkbaar met de langs de Niederrhein en in Nederland geldige maatgevende hoogwaters.

Doel van deze berekeningen is het vaststellen van de gezamenlijke effecten van de overstromingen en de hoogwaterverlagende maatregelen in Nordrhein-Westfalen en in Gelderland op de waterstand en afvoer in de rivier. Hiervoor zijn de uit de Delft-FLS berekeningen resulterende inzichten over het debiet, dat als gevolg van de overstromingen van de rivier onttrokken en weer teruggevoerd wordt, alsmede de overstromingsvolumina, naar het ééndimensionale model SOBEK overgedragen. De overstroomde oppervlaktes en overstromingsvolumina zijn modelmatig als retentiebekkens geschematiseerd.

Verder zijn berekeningen uitgevoerd, waarbij de effecten van dijkoverstromingen buiten beschouwing zijn gebleven. Hierdoor zijn uitspraken mogelijk over de beschikbare hoeveelheid water die op basis van gegeven neerslag uit het stroomgebied bij Lobith kan komen, zonder te kijken, of dit water door het bestaande hydraulische systeem kan worden verwerkt.

Om op flexibele wijze varianten door te kunnen rekenen, is het Decision Support System DSS-large rivers toegepast.

4. Inschatting van de effecten van klimaatverandering

Binnen de tijdsduur van het project konden geen concrete berekeningen voor de afvoer uit het Rijnstroomgebied op basis van klimaatscenario's uitgevoerd worden. Daarom werden alleen kwalitatieve uitspraken gedaan over de effecten van klimaatveranderingen op de afvoer uit het Rijnstroomgebied. In het algemeen wordt ervan uitgegaan, dat in de toekomst met hogere afvoeren rekening moet worden gehouden. Om toch een verkenning te kunnen maken van de effecten van nog hogere afvoeren op overstromingen langs de Niederrhein, is één nog hogere afvoergolf doorgerekend.

Resultaten

1. Extreme Afvoeren

Beschikbare hoeveelheid van water uit het Rijnstroomgebied

In het Rijnstroomgebied zijn neerslagpatronen mogelijk, die zonder rekening te houden met dijkoverstromingen op de Ober- en Niederrhein, tot een piekafvoer bij Andernach van rond 17800 m³/s en bij Lobith van rond 18700 m³/s leiden. Deze resultaten geven uitsluitend aan, wat de beschikbare hoeveelheid water is die als gevolg van neerslag in het stroomgebied kan worden gegenereerd, maar beantwoorden niet de vraag, of het hydraulische systeem deze hoeveelheid ook kan afvoeren.

Afvoeren rekening houdend met dijkoverstromen

Onder de omschreven extreme omstandigheden vinden op de Oberrhein overstromingen plaats. Dit leidt tot een afvlakking van de afvoertop bij Andernach tot ca. 15300 m³/s. Bij verwaarlozing van overstromingen langs de Niederrhein zou bij Lobith 16700 m³/s kunnen optreden.

Omdat er onder extreme omstandigheden ook overstromingen langs de Niederrhein plaatsvinden, wordt de afvoergolf verder afgevlakt zodat bij Lobith een piekafvoer van 15500 m³/s kan worden verwacht.

Zowel de hoogwaterverlagende maatregelen die tot 2020 langs de Oberrhein, in NRW en langs de Nederlandse Rijntakken gepland zijn, als de dijkverbeteringsmaatregelen die momenteel in NRW in uitvoering zijn, leiden niet tot wezenlijke verandering van het genoemde dempende effect van de dijkoverstromingen en daarmee wezenlijke verandering van de afvoer bij Andernach en Lobith.

2. Overstromingen langs de Niederrhein

Bij de onderzochte extreme hoogwaters treden in de huidige situatie op de Niederrhein bij een afvoer van 11000 tot 16000 m³/s grootschalige overstromingen op. Hierbij overstroomt de zuidelijke Niederrhein (omtrek Köln/Bonn tot ca. Düsseldorf/Dormagen) als eerste. Bij steeds hoger wordende topafvoeren overstroomt ook het middelste gedeelte (Düsseldorf/Dormagen tot ongeveer de monding van de Ruhr). In het noordelijke deel (vanaf de monding van de Ruhr tot aan de modelgrens) vinden bij de gegeven uitgangspunten geen dijkoverstromingen plaats, maar wordt wel een groot deel van de waakhoogte belast. Alleen in Emmerich kunnen, totdat de verbetering van de keermuur is afgerond, bij afvoeren boven 14000 m³/s overstromingen plaatsvinden.

Door de dijkverbeteringen in NRW wordt plaatselijk het beschermingsniveau verhoogd. Bij deze extreme hoogwaters, die hoger dan de maatgevende afvoer zijn, beginnen de gebieden in het zuidelijke en middelste deel van de Niederrhein als gevolg hiervan pas later onder water te lopen. Een overstroming van deze gebieden kan echter niet worden voorkomen.

In het noordelijke gedeelte vinden na afronding van de dijkversterkingen tot een afvoer van 16000 m³/s ook op die trajecten met een lagere waakhoogte zoals bij keermuren, geen overstromingen plaats. Deze afvoercapaciteit komt overeen met de maatgevende afvoer in Nederland. De afvoercapaciteit van de Duitse dijken in het noordelijke deel is groter.

Bij overstromingen vinden binnendijs parallel aan de Rijn stromingen plaats. Daardoor kunnen gebieden toch overstroomd, terwijl ze eigenlijk tot een hoger niveau beschermd zijn. Een deel van dit parallel aan de Rijn stromende water stroomt ook weer terug in de Rijn.

3. Effect van overstromingen op de piekafvoeren en de golfvorm

Overstromingen leiden tot waterverlies in de rivier, waardoor de piekafvoeren worden verlaagd. De berekende afvoer- en waterstandsverlagende effecten van de dijkoverstromingen zijn groter dan die van de hoogwaterverlagende maatregelen. Dit komt doordat de door overstromingen ingenomen oppervlakten en volumina achter de dijken groter zijn dan de oppervlakten en volumina van de retentiemaatregelen in NRW.

De overstromingen in de omgeving van Köln/Bonn tot ca. Duisburg/Krefeld hebben een duidelijke afvlakking van de afvoergolven tot gevolg. Tegelijkertijd worden de golven met ca. een halve dag verlengd. De hoogwaterverlagende maatregelen hebben dezelfde effecten alhoewel duidelijk geringer.

Door de dijkverbeteringsmaatregelen in NRW worden de waterkeringen zodanig aangepast, dat zij in toekomst de maatgevende afvoer kunnen keren. Dit betekent, dat de dijken in delen worden verhoogd en op een doorgaande dijkkring op het bedoelde niveau worden gebracht. Dit is voornamelijk van toepassing in het gebied van Köln/Bonn tot Düsseldorf/Krefeld. Daardoor wordt lokaal een hoger beschermingsniveau gerealiseerd. Het overstroomd van dijken bij extreem hoogwater vindt later plaats, dus dicht bij de piekafvoer van de hoogwatergolf. Dit betekent, dat de waterstands- en afvoerverlagende effecten van de overstromingen afhankelijk van het hoogwater in beperkte mate kan toenemen.

4. *Effect hoogwaterverlagende maatregelen op waterstand en piekafvoer*

Het effect van retentiegebieden op de piekafvoeren is in sterke mate afhankelijk van de hoogte van de piekafvoer en de golfvorm. Daarom moet de inzet van retentiegebieden nauwkeurig worden gedefinieerd en door middel van bouwtechnische maatregelen zoals gestuurde of ongestuurde in- en uitlaatwerken gerealiseerd.

Dijkverleggingen hebben voornamelijk lokaal en bovenstrooms invloed. Door verbreding van het stroomvoerend profiel wordt bij dezelfde afvoer een verlaging van de waterstand bereikt. Wanneer de overgang naar de bestaande dijklijn tot een duidelijke vernauwing van het profiel leidt zal direct benedenstrooms zelfs een kleine verhoging van de waterstand optreden. Hiermee dient bij het plannen van dergelijke maatregelen rekening te worden gehouden.

Het systeem van hoogwaterverlagende maatregelen langs de Niederrhein is momenteel het meest effectief bij hoogwaters in de orde van grootte van het hoogwater van 1995. Door de retentiemaatregelen doelgerichter in te zetten, kan een beter effect op hoogwaters met een piekafvoer dicht bij de maatgevende afvoer worden gerealiseerd.

Door de geplande maatregelen in NRW worden de afvoergolven met een piekafvoer rond de maatgevende afvoer in het gebied bij Bislich, ca. 40 km bovenstrooms van de Duits-Nederlandse grens, met ca. 15 tot 20 cm en aan de grens met 1 cm verlaagd.

Bij een goede afregeling van de maatregelen voor het bereik rond de maatgevende afvoer, kan het waterstandsverlagende effect worden verbeterd. Daardoor zou in het gebied bij Bislich een waterstandsval van 25 tot 30 cm en aan de Duits-Nederlandse grens van 6 cm kunnen worden bereikt.

De waterstandsverlagende maatregelen in Nederland moeten ervoor zorgen, dat in de toekomst in plaats van 15000 m³/s een afvoer van 16000 m³/s veilig kan worden afgevoerd. Hierdoor wordt aan de Duits-Nederlandse grens een waterstandsval van 30 cm bereikt. Deze maatregel heeft nog tot 50 km bovenstrooms een waterstandsverlagend effect.

Door het gecombineerde effect van de geplande maatregelen in Nederland en de maatregelen in NRW kan, bij extreme hoogwaters rond de maatgevende afvoer, een waterstandverlaging worden gerealiseerd van maximaal 30 cm bij de grens en maximaal 25 cm bij Bislich/Lohrwardt. Bij een op de maatgevende afvoer afgestemde variant van de maatregelen in NRW en een aantal aanvullende maatregelen bij Orsoyer Bogen en Bislich is zelfs een waterstandsval tot 40 cm bij de grens en bij Bislich/Lohrwardt mogelijk. Op andere plaatsen valt de verlaging van de waterstand bescheidener uit.

Doordat de maatregelen in NRW en in Nederland elkaar versterken, wordt bijvoorbeeld het vroegtijdige overstromen van de keermuur in Emmerich tegengegaan. Bij overstroming van deze keermuur zou ook Nederlands gebied overstromen.

Dit voorbeeld illustreert het nut van grensoverschrijdende inspanningen op het gebied van hoogwaterbescherming en maakt het belang van een

grensoverschrijdende afstemming van hoogwaterrelevante plannen en maatregelen duidelijk.

5. Klimaatveranderingen

Op grond van de momenteel beschikbare informatie gaat men ervan uit dat de globale temperatuur in de loop van de komende 100 jaar zal stijgen. Afhankelijk van het CO₂-emissie-scenario wordt uitgegaan van een stijging met 1,4 tot 5,8°C.

Uitspraken over de effecten van klimaatverandering op de extreme afvoeren in het Rijnstroomgebied, kunnen alleen kwalitatief worden gedaan:

- Er kan vanuit worden uitgegaan dat klimaatverandering leidt tot een toename van de afvoer van de Rijn in het winterhalfjaar;
- Een afname van de afvoer in zomer lijkt niet onwaarschijnlijk aangezien veel scenario's uitgaan van een vermindering van de neerslag en hogere temperaturen de verdamping versterken;
- De onzekerheden bij het inschatten van afvoerveranderingen als gevolg van een klimaatverandering zijn zeer groot, met name voor extreme gebeurtenissen. Wel staat vast dat de frequentie van lang aanhoudende neerslagrijke periodes zal toenemen. Dit ondersteunt de hypothese dat ook moet worden uitgegaan van een stijgende frequentie van het optreden van hoogwaters. In welke mate dit zijn weerslag heeft op het zich voordoen van extreme gebeurtenissen bij Andernach, moet nog nader worden onderzocht.

Om toch een inschatting te kunnen geven van de gevolgen van nog hogere afvoeren uit het stroomgebied, zijn berekeningen uitgevoerd met de hoogst beschikbare afvoergolf bij Andernach. Deze heeft een piekafvoer van 17800 m³/s. Of deze piekafvoer überhaupt kan optreden blijft bij deze verkennende berekening buiten beschouwing.

Door de overstromingen langs de Niederrhein wordt een dergelijke golf bij Lobith gedempt tot een piekafvoer van 16500 m³/s.

Zo als bij de eerder genoemde berekeningen wordt deze demping veroorzaakt door dijkoverstromingen in het gebied tot aan Krefeld. De binnendijkse overstromingen zijn nog grootschaliger. Er kan water achter de dijken langs voorbij Xanten tot bij Kleve stromen. Een overstroming via de Niers in de richting van de Maas is niet opgetreden. De berekeningen maken echter duidelijk, dat de waterstand in het overstroomde gebied maar weinig hoeft te stijgen, voordat het water de waterscheiding overschrijdt.

Er vinden geen dijkoverstromingen benedenstrooms van Krefeld plaats. In dit traject treden echter waterstanden op, die voornamelijk bij hoogwaterkeermuren zoals in Rees en Emmerich op kruinhoogte zijn.

6. Nauwkeurigheid van de resultaten

De resultaten van het hier gepresenteerde onderzoek berusten op berekeningen met aan elkaar gekoppelde statistische en numerieke modellen. De nauwkeurigheid van de modelresultaten worden bepaald door de gekozen modelparameters en randvoorwaarden (bijv. de methode voor het berekenen van de overstromingen, nauwkeurigheid van de afvoeren uit de zijrivieren en de Rijn uit het stroomgebied, verwaarlozing van de morfologische ontwikkeling van de Rijn etc.). Bij een beoordeling van onderzoekresultaten moet na een

beschouwing van al deze factoren worden uitgegaan van een mogelijke onnauwkeurigheid in de orde van ca. 500 m³/s.

Slotopmerking en vooruitzicht

Alle resultaten gelden alleen voor de situatie op de Niederrhein en de Nederlandse Rijnakken zoals die in de modellen is verwerkt. Met name veranderingen aan de dijken kunnen de resultaten aanzienlijk beïnvloeden. Omdat het hydraulische systeem van de Niederrhein met inbegrip van het binnendijkse gebied uitermate complex is, is het onmogelijk te voorspellen, hoe groot deze invloed is, zonder opnieuw berekeningen uit te voeren. Veranderingen dienen daarom steeds in de modellen gedetailleerd meegenomen te worden.

Het is duidelijk, dat ook in de toekomst samenwerking met boven- en benedenstroomse gebieden belangrijk blijft. Het uitwisselen van gegevens en informatie als het onderlinge afstemmen van maatregelen op het gebied van hoogwaterbescherming zijn voorbeelden hiervan. Verder onderzoek op het gebied van de gevolgen van klimaatveranderingen, effecten van ingrepen in het bestaande riviersysteem, ontwikkeling nieuwe methoden bijv. voor het opmaken van hoogwaterstatistieken en hoogwatervoorspellingen is van gemeenschappelijke belang.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Hoogwater langs de Rijn is al sinds eeuwen een bekend natuurverschijnsel. Aanvankelijk probeerde de mens zich door kleinschalige, lokale maatregelen tegen de hoge waterstanden te beschermen. In de loop der eeuwen ontwikkelden zich daaruit grotere beschermingssystemen die uiteindelijk resulteerden in samenhangende beschermingsstelsels die zich over langere trajecten uitstrekten. Vanwege de historische ontwikkeling en de verschillende omstandigheden, die vaak een gevolg waren van de politiek-culturele situatie, vormen deze maatregelen echter nog geen uniforme eenheid. De methode voor het ontwerpen van dijken, het bepalen van de dijkhoogte en de dijkopbouw zijn in Nederland bijvoorbeeld anders dan in Duitsland. Dit leidt onvermijdelijk tot de vraag hoe het in een hydrologisch/hydraulisch samenhangend gebied is gesteld met het veiligheidsniveau op de grens tussen twee van dergelijke systemen en wat de gevolgen daarvan zijn.

Het feit dat tijdens het hoogwater van 1995 in het Duits-Nederlandse grensgebied de dijken langs de Rijn dreigden door te breken, zorgde ervoor dat het publiek er zich bewust van werd dat er grensoverschrijdende voorzorgs- en beschermingsmaatregelen moeten worden getroffen om de veiligheid te verhogen en de schade die door een hoogwater ontstaat te beperken. Om dit te stimuleren ondertekenden de Provincie Gelderland, Rijkswaterstaat en het Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen (tegenwoordig: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) in november 1997 een *Gemeenschappelijke Verklaring over Samenwerking op het gebied van duurzame Bescherming tegen Hoogwater*. In de overeenkomst verklaren de partijen dat zij het onderzoek en de ontwikkelingen met betrekking tot de betere bescherming tegen hoogwater op elkaar zullen afstemmen. Het belangrijkste orgaan bij deze samenwerking is de Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater.

In de loop van de steeds intensievere samenwerking tussen Nordrhein-Westfalen (NRW), de Provincie Gelderland en Rijkswaterstaat werd duidelijk dat het totale systeem van de *Duitse Niederrhein / Nederlandse Rijntakken* nog niet volledig wordt begrepen, hoewel de geschiedenis leert dat er grensoverschrijdende overstromingen zijn geweest. Details daarover, of dit tegenwoordig nog steeds mogelijk is, bij welke hoogwaterstanden dit kan gebeuren, hoe en waar de overstromingen zullen plaatsvinden, welke effecten deze op andere plaatsen zullen hebben, welke effecten de huidige dijkversterkingen en het inzetten van hoogwaterreducerende maatregelen aan beide zijden van de grens zullen hebben, lijken echter de basis te vormen voor een verdere, gezamenlijke aanpak bij de grensoverschrijdende hoogwaterbescherming.

Bovendien heeft elk van de betrokken partijen er zelf groot belang bij om meer te weten te komen over het functioneren van het totale systeem *Duitse Niederrhein / Nederlandse Rijntakken* waarbij rekening wordt gehouden met het hele stroomgebied van de Rijn. De actuele dijkversterkingen in NRW, de maatregelen voor de verhoging van de afvoercapaciteit in Nederland in het kader van de PKB Ruimte voor de Rivier, de discussie over het, vooral in Duitsland, compartimenteren van polders die tegen hoogwater worden beschermd, de overwegingen met betrekking tot het inrichten van

noodoverloopgebieden in Nederland, en de vraag naar maatgevende afvoeren voor de dimensionering van de waterkeringen maken duidelijk dat er behoefte bestaat aan meer kennis van het systeem.

Om de noodzakelijke kennis voor de verdere aanpak van de grensoverschrijdende hoogwaterbescherming te kunnen opdoen, riep de *Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater* uiteindelijk het project “Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein” in het leven. In nauw overleg met de werkgroep werd het project onder leiding van het RIZA uitgevoerd door de Provincie Gelderland, het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), het Landesumweltamt (LUA) in Düsseldorf en de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

Dit project werd medegefinancierd door de EU in het kader van INTERREG IIIB NWE, onder de naam “Extreme Floods and Flood Protection along the Rhine (FAR)”, projectnummer B025 FAR. De verantwoording van het project tegenover de EU gebeurde door de Provincie Gelderland.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het project kan in essentie aan de hand van de volgende kernvragen worden samengevat:

Kernvraag 1: Hoeveel water kan in extreme omstandigheden uit het stroomgebied van de Rijn (bovenstrooms van het systeem *Duitse Niederrhein / Nederlandse Rijntakken*) worden verwacht?

Hierbij moet zowel met de huidige als met de toekomstige omstandigheden ten aanzien van de retentiemaatregelen langs de Oberrhein en de eventuele klimaatveranderingen rekening worden gehouden.

Kernvraag 2: Hoeveel water kan er tussen de dijken via de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken worden afgevoerd? Waar vinden dijkoverstromingen plaats en wat zijn de effecten op de hoogwatergolven?

Hierbij moet rekening worden gehouden met de huidige toestand van de waterkeringen en ook met de toestand na de voltooiing van de huidige dijkversterkingen in NRW respectievelijk met de maatregelen ter verhoging van de afvoercapaciteit in Nederland (project Ruimte voor de Rivier).

Kernvraag 3: Wat gebeurt er wanneer het water niet tussen de dijken kan worden afgevoerd? Welke binnendijkse gebieden worden het eerst overstroomd? Zijn grensoverschrijdende overstromingen mogelijk?

Ook hierbij moet zowel met de huidige als met de toekomstige toestand van de waterkeringen rekening worden gehouden.

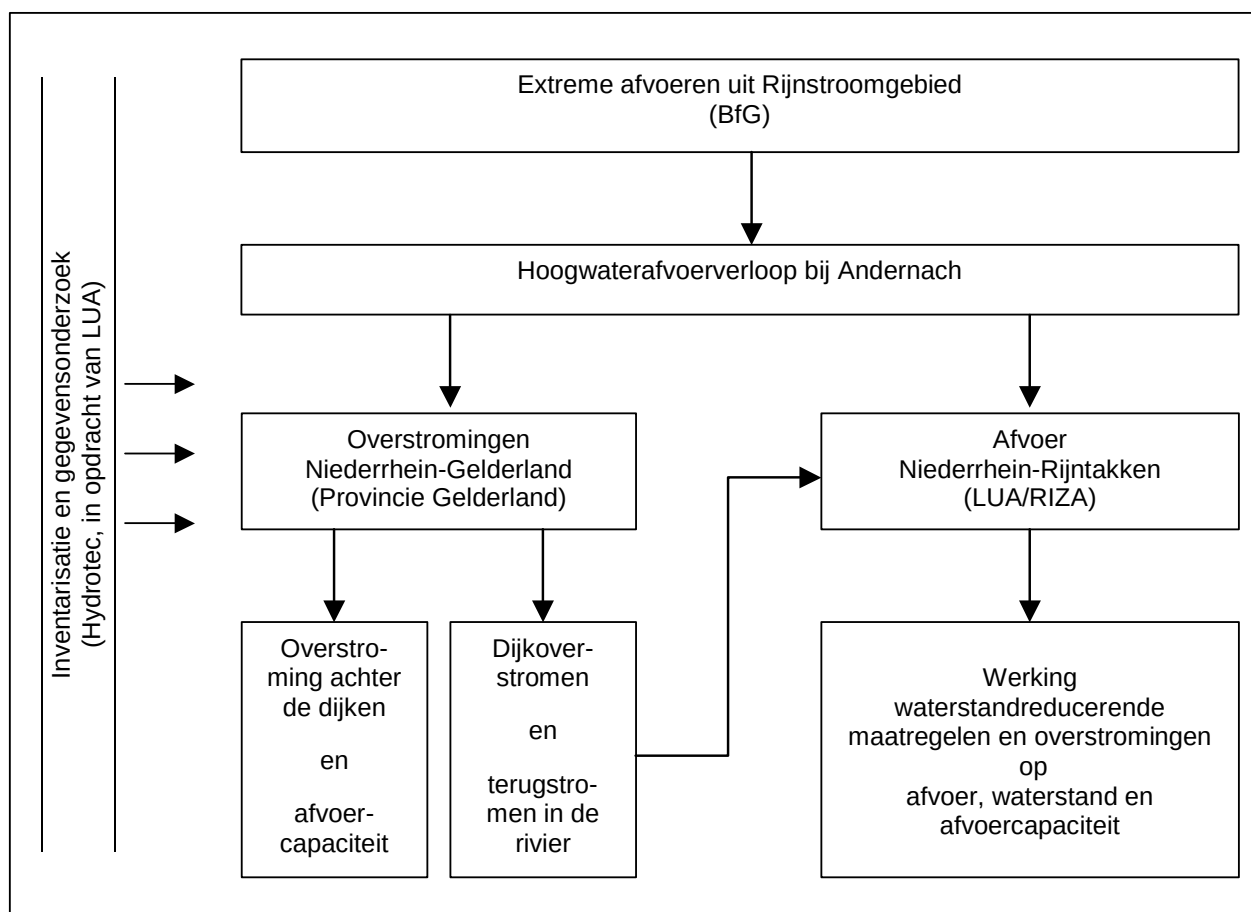
Kernvraag 4: Wat zijn de effecten van hoogwaterverlagende maatregelen?

Hierbij moet zowel met het effect van de al bestaande maatregelen, het effect van geplande maatregelen en ook met eventueel andere waterstandreducerende maatregelen rekening worden gehouden.

Om dit project te kunnen realiseren zou zoveel mogelijk van het bestaande onderzoeksinstrumentarium (modellen) gebruik moeten worden gemaakt.

1.3 Aanpak van het project

Figuur 1-1 geeft een overzicht van de algemene aanpak van het project.



Figuur 1-1: Projectaanpak.

Om te beginnen werd met behulp van een neerslaggenerator voor het gehele stroomgebied van de Rijn een 1000 jarige neerslag en temperatuur reeks gegenereerd en met een neerslag-afvoer model werd de afvoer gedurende 1000 jaren berekend. De berekende afvoer van de zijrivieren van de Rijn vanaf Basel, en ook van de Rijn zelf bij Basel dienden als invoer voor een eendimensionale berekening van de afvoer tijdens extreme omstandigheden tussen Basel en Andernach (Lobith). Hierbij werd rekening gehouden met dijkoverstromingen langs de Ober- en Mittlerrhein, en ook met de retentiemaatregelen voor de reductie van de waterstanden bij hoogwater langs de Oberrhein.

Deze werkzaamheden werden door het Duitse Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) uitgevoerd. In de hoofdstukken 3.1 respectievelijk 4 en 9.2 worden de methodiek en de resultaten nader uiteengezet. Ook bestaat er een gedetailleerd rapport dat door de BfG is samengesteld (Eberle et al., 2004)

Op basis van de door de BfG berekende extreme afvoergolven bij Andernach en de bijbehorende afvoergolven van de zijrivieren van de Rijn werden met het tweedimensionale overstromingsmodel Delft-FLS vanaf Rijn-km 642 (Nonnenwerth bij Bad Honnef) overstromingsberekeningen voor de Rijn uitgevoerd. Hierdoor is het mogelijk om uitspraken te doen over de plaats en

de tijd van overstromingen bij waterkeringen, over dijkdoorbraken die daarvan het gevolg zijn, en ook over overstromingen en het weer terugstromen van het water naar de rivier.

Deze werkzaamheden werden door de Provincie Gelderland uitgevoerd en zijn door Gudden (2004) beschreven. Documentatie over de kalibratie van het model is te vinden in Van Mierlo et al. (2003). In hoofdstuk 3.3, hoofdstuk 5 en hoofdstuk 9.3 wordt een overzicht gegeven van de methodiek en de belangrijkste resultaten.

Eveneens gebaseerd op de door de BfG berekende hoogwatergolven werd met het eendimensionale model SOBEK het afvoerverloop in de Rijn vanaf Andernach tot in de Nederlandse Rijntakken berekend. Voor het betere beheer van de maatregelenvarianten die moesten worden berekend, werd gebruik gemaakt van het Decision Support System DSS-large rivers (ook bekend als BOS Inrichting Rivieren / BOS-IR).

Allereerst werden de met de Delft-FLS verkregen inzichten over de dijkoverstromingen en het terugstromen naar de rivier, evenals de overstromingsvolumes, naar het SOBEK-model overgezet. Daarbij werden de overstroomde gebieden en overstromingsvolumes in het SOBEK-model als retentiebekkens gemodelleerd. Door kalibratie van de parameters die de toe- en afvoer naar, respectievelijk vanaf het retentiebekken en de waterstanden in het retentiegebied beïnvloeden, werd het eendimensionale model SOBEK aangepast aan de resultaten van het tweedimensionale overstromingsmodel Delft-FLS (het verloop in de tijd van de toe- en afvoer naar de overstromingsgebieden, het verloop van de afvoergolf in de rivier). Deze werkzaamheden werden in intensieve samenwerking tussen het RIZA en de Provincie Gelderland uitgevoerd. Om de procedure te kunnen bepalen van deze zogeheten “koppeling van de modellen Delft-FLS en SOBEK/DSS” werd in opdracht van het RIZA een draaiboek geschreven (Hartman, 2002). De beschrijving over de kalibratie zelf is te vinden in Van der Veen et al. (2004a). De voor de beschrijving van de overstromingen gedefinieerde retentiebekkens zijn uiteindelijk in het DSS ingebouwd. Hoofdstuk 3.3.2. geeft een overzicht.

In een tweede stap werden de hoogwaterreducerende maatregelen in NRW en Nederland in het DSS ingebouwd. De beschrijving hiervan is te vinden in Van der Veen et al. (2004a) en Mehlig (2004). De resultaten van de berekeningen in het DSS met betrekking tot het effect van de maatregelen en de overstromingen op het verloop van de hoogwatergolf (topwaterstanden, afvoer en tijdsduur) zijn te vinden in Van der Veen et al. (2004b) en Mehlig (2004). Deze werkzaamheden werden bij het RIZA en het LUA uitgevoerd. Op deze resultaten wordt vooral in hoofdstuk 6 ingegaan. De methodiek en de berekende scenario's zijn onderwerp van hoofdstuk 3.4.

In het kader van een voorstudie werden aan het begin van het project verkennende berekeningen met het DSS uitgevoerd om het uit twee gekoppelde SOBEK-modellen bestaande DSS alsmede ook de software te testen. Bovendien konden de eerste algemene inzichten in het hydraulische functioneren van het systeem “Niederrhein / Rijntakken” worden verkregen. Deze werkzaamheden werden bij het RIZA en het LUA uitgevoerd en zijn door Kroekenstoel et al. (2003) beschreven.

Voor de uitwerking van het project was een uitgebreide inventarisatie en gegevensverzameling noodzakelijk. Dit was nodig om de basisgegevens (hoogtemodel, dijkligging en -hoogte, waterstandreducerende maatregelen) beschikbaar te krijgen, maar omvatte ook een inventarisatie van projecten met

een soortgelijke thematiek. Hierbij valt te denken aan bestaande modellen van de Rijn en het stroomgebied van de Rijn en historisch opgetreden overstromingen. Deze werkzaamheden staan beschreven in Landesumweltamt NRW (2003).

1.4 Organisatie van het project

Ten behoeve van een goede projectorganisatie werd in vier deelprojecten gewerkt:

Deelproject 1:

Inventarisatie en gegevensonderzoek, uitgevoerd door Hydrotec, Ingenieursgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aken. In opdracht van het Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Deelproject 2:

Afvoer in het Rijngebied, bovenstrooms van Andernach. Uitgevoerd door de volgende medewerkers van de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz: mevrouw Eberle en de heren Hammer, Busch, Engel, Krahe en de heer Dr. Wilke.

Deelproject 3:

Afvoer in het Rijngebied benedenstrooms van Andernach. Uitgevoerd door de volgende medewerkers van het Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen in Düsseldorf en het RIZA in Arnhem: de heer Mehlig (LUA), de heer Brinkmann (LUA), mevrouw Dr. Lammersen (RIZA), de heer Van der Veen (RIZA), de heer Kroekenstoel (RIZA), de heer Schutte (RIZA) en de heer Van Essen (RIZA).

Deelproject 4:

Overstromingen in Nordrhein-Westfalen en Gelderland. Uitgevoerd door de heer Gudden van de Provincie Gelderland.

De projectleiding was in handen van mevrouw Dr. Lammersen, RIZA.

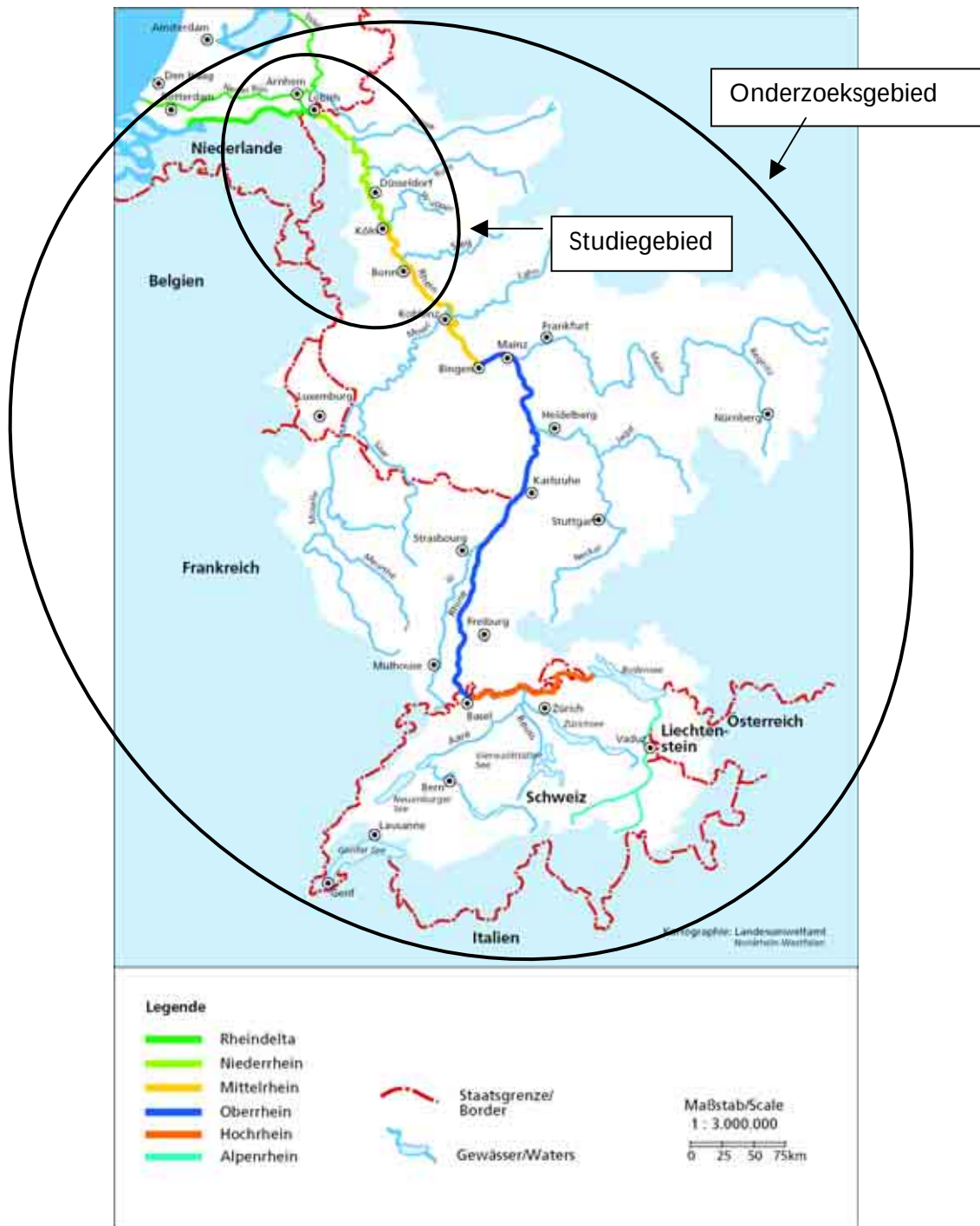
Over het geheel genomen was een intensieve samenwerking en afstemming tussen de direct bij de onderzoeken betrokken medewerkers in gelijke mate nodig als de expertise van de deskundigen van het Staatliche Umweltamt Krefeld (de heren Buschhüter, Nebelung en Isselhorst), het Staatliche Umweltamt Köln (de heer Schaa) en het Wasser- und Schifffahrtsamt Duisburg-Rhein (de heer Abel), die vooral hebben bijgedragen bij het verstrekken van de gegevens en het valideren van de resultaten.

Het fundament voor de samenwerking werd gelegd in drie workshops waarvoor zowel de projectmedewerkers als de leden van de Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater waren uitgenodigd. Op deze manier konden belangrijke afspraken worden gemaakt over de technische uitvoering van het project. Hiermee werd een algemene consensus gewaarborgd, bijvoorbeeld over de uitgangspunten voor het model en dus ook over de resultaten.

2 Onderzoeksgebied

2.1 Definitie onderzoeksgebied en studiegebied

Het onderzoeksgebied heeft in principe betrekking op het gehele stroomgebied van de Rijn, met inbegrip van de Nederlandse Rijntakken (Figuur 2-1).



Figuur 2-1: Onderzoeksgebied en studiegebied (volgens LUA, 2002).

Afhankelijk van de vraagstelling en de gedetailleerdheid van de beschouwing wordt het gehele gebied of slechts een deelgebied onder de loep genomen. Voor dit onderzoek ligt het accent vooral op de Rijn in Nordrhein-Westfalen en Gelderland. Dit gebied wordt hierna het *studiegebied* genoemd. Het omvat het gebied van de Rijn vanaf ongeveer Bonn, inclusief de Nederlandse Rijntakken en houdt ook rekening met het omliggende land langs dit gedeelte van de Rijn en daarmee met het gebied dat potentieel door overstromingen wordt bedreigd.

De hoogwatersituatie in het studiegebied is afhankelijk van het wateraanbod en het afvoerverloop. Details kunnen daarbij beter buiten beschouwing blijven. Daarom wordt het hele stroomgebied bij het onderzoek betrokken. Hieronder zal dit gebied het *onderzoeksgebied* (in feitelijke zin) worden genoemd.

2.2 Hydrologie

Het *onderzoeksgebied* omvat het hele stroomgebied van de Rijn tot aan de monding van de *IJssel* in het *IJsselmeer*, *Krimpen aan de Lek* aan de *Lek* en *Werkendam* aan de *Waal / Boven - Merwede* met een stroomgebiedoppervlakte van 166200 km². Hiervan komt ongeveer 160800 km² voor rekening van het stroomgebied van de Rijn tot Lobith, direct boven de eerste vertakking bij Pannerden. De resterende 5400 km² betreft het gebied van de Nederlandse Rijntakken.

Het stroomgebied van de Rijn wordt meestal in 6 deeltrajecten opgedeeld: de Alpenrhein, de Hochrhein, de Oberrhein, de Mittellrhein, de Niederrhein en de Rijndelta (Figuur 2-1). In Tabel 2-1 zijn de belangrijkste zijrivieren met hun hydrologische kengetallen samengevat.

Tabel 2-1: Belangrijke zijrivieren van de Rijn en enkele kengetallen bij de meetstations (bron: Eberle et al., 2004).

Rivier	Station	A _{Eo} [km ²]	MQ [m ³ /s]	MHQ [m ³ /s]	HQ [m ³ /s]	Referentieperiode MQ, MHQ, HQ
Rhein	Basel	35929	1060	2880	5090	1931-1999
Neckar	Rockenau	12710	135	1180	2690	1951-1999
Main	Raunheim	(24764)	(190)	(941)	(2010)	1966-1998
Nahe	Grolsheim	4013	31,2	457	1000	1973-1998
Lahn	Kalkofen	5304	46,6	385	840	1936-1998
Mosel	Cochem	27088	312	2080	4170	1931-1998
Sieg	Menden	2825	52,0	562	1050	1965-1998
Ruhr	Hattingen	4118	69,4	563	907	1968-1998
Lippe	Schermbeck	4783	44,5	243	361	1965-1998

- () meetstation Frankfurt voor Raunheim
A_{Eo} oppervlak stroomgebied tot meetstation
MQ gemiddelde afvoer in referentieperiode
MHQ gemiddelde jaarmaxima in de referentieperiode
HQ maximale afvoer in de referentieperiode

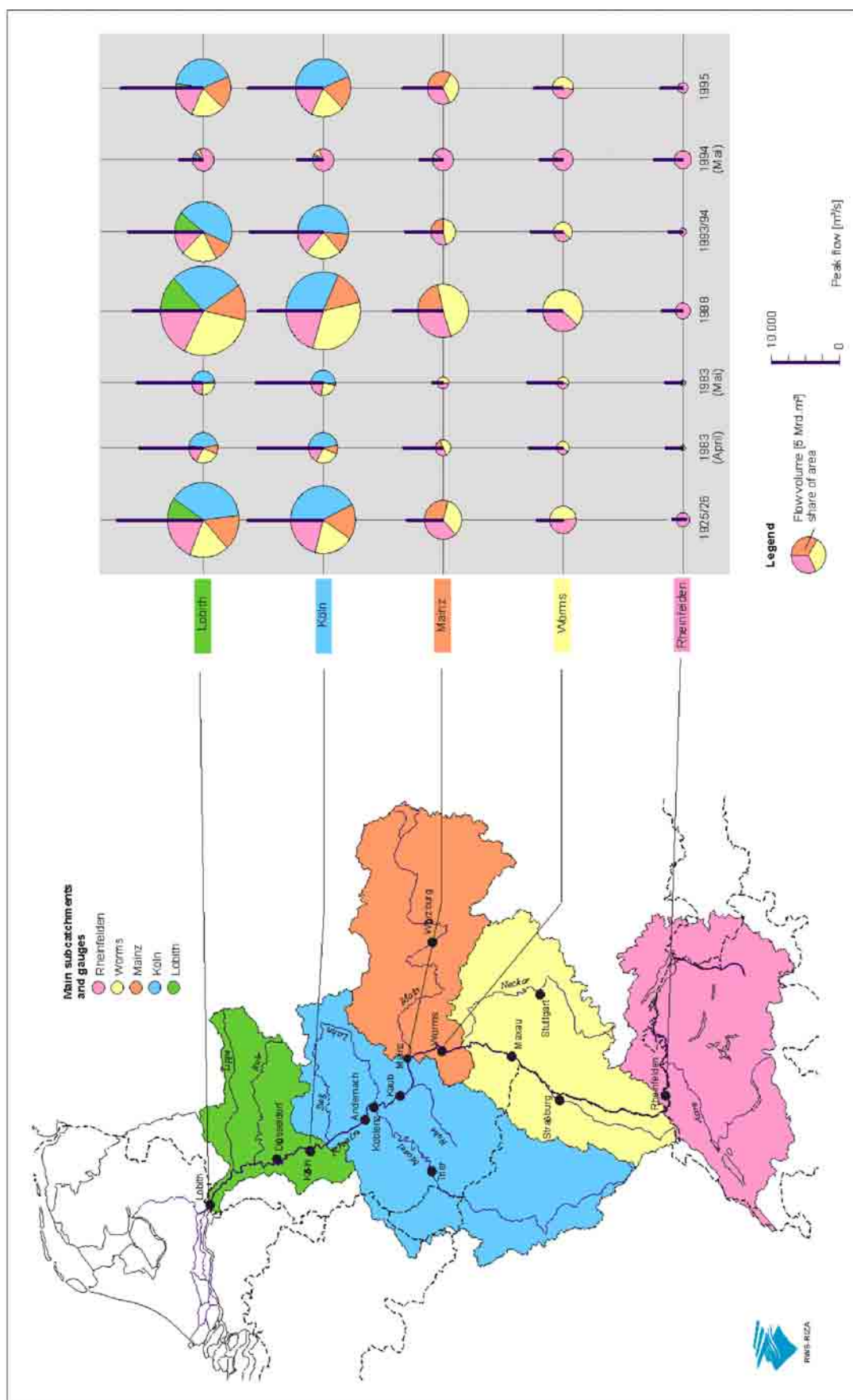
Bron: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ
Bron: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ
Bron: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ
Bron: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ

Typerend voor het hoogwaterverloop in de Rijn is het feit dat de verhouding van de gemiddelde hoogwaterafvoeren (MHQ) tussen de zomer- en winterhalfjaren verschuift (Tabel 2-2). Waar op de Hochrhein (Rheinfelden) en op het zuidelijke deel van de Oberrhein de grootste hoogwaterafvoeren in de zomer optreden, begint de verhouding op de noordelijke Oberrhein tussen Worms en Mainz om te keren. Op de Niederrhein en in de Rijndelta zijn daarentegen de winterhoogwaters maatgevend. Maar zomerhoogwaters kunnen langs de Niederrhein niet helemaal worden uitgesloten.

Tabel 2-2: Gemiddelde langjarige hoogwaterafvoeren (MHQ) voor de winter- en zomerhalfjaren bij de meetstations van de Rijn (bron: LUA, 2002).

Meetstation	Stroomgebied [km ²]	Wi MHQ [m ³ /s]	Zo MHQ [m ³ /s]	Wi MHQ : Zo MHQ
Rheinfelden	34550	2220	2590	0,86 : 1,0
Maxau	50196	2650	2690	1,0 : 1,0
Worms	68827	3060	2720	1,1 : 1,0
Mainz	98206	3880	2980	1,3 : 1,0
Köln	144232	6300	3810	1,7 : 1,0
Rees	159300	6530	3940	1,7 : 1,0

De periodes met een hogere neerslag zijn echter niet alleen bepalend voor het ontstaan van hoogwater in het stroomgebied van de Rijn. Van belang is namelijk ook het feit dat de golven uit de deelstroomgebieden elkaar overlappen en in de Rijn samenvallen. Voor elk hoogwater kan de bijdrage van de zijrivieren zeer verschillend uitpakken (Figuur 2-2).



Figuur 2-2: Hoogwatergenese op de Rijn tussen Rheinfelden en Lobith.

2.3 Hoogwaterbescherming en afvoercapaciteit

2.3.1 Definitie maatgevende afvoer, afvoervermogen en afvoercapaciteit

Maatgevende afvoer, afvoervermogen en afvoercapaciteit zijn begrippen die moeten worden gebruikt om uitspraken te kunnen doen over de waterhoeveelheden die langs een maatregel voor de hoogwaterbescherming kunnen worden geleid. Alleen voor het begrip *maatgevende afvoer* bestaat een eenduidige definitie. Met betrekking tot de waterkeringen moeten daarom de begrippen afvoervermogen en afvoercapaciteit eerst worden gedefinieerd voordat deze hieronder kunnen worden gebruikt.

Maatgevend hoogwater wordt gedefinieerd als de situatie waaraan de dimensionering van een waterkering wordt afgemeten. Zowel in Nederland als in Duitsland ligt hieraan een afvoer bij een bepaalde herhalingsfrequentie ten grondslag. De hoogte van de waterkeringen wordt vervolgens bepaald door de bijbehorende waterstand, verhoogd met de waakhogte van de dijk. Dit laatste moet een extra bescherming bieden tegen andere fenomenen dan de waterhoogte, zoals golfslag, invloed van de wind, enz. In Nederland bedraagt de waakhogte 0,5 meter. In Duitsland wordt in overeenstemming met DIN 19712 een waakhogte van 0,5 tot 1 m bij dijken en van 0,1 tot 0,5 m voor keermuren als regel aanbevolen. In afzonderlijke gevallen kan hiervan worden afgeweken.

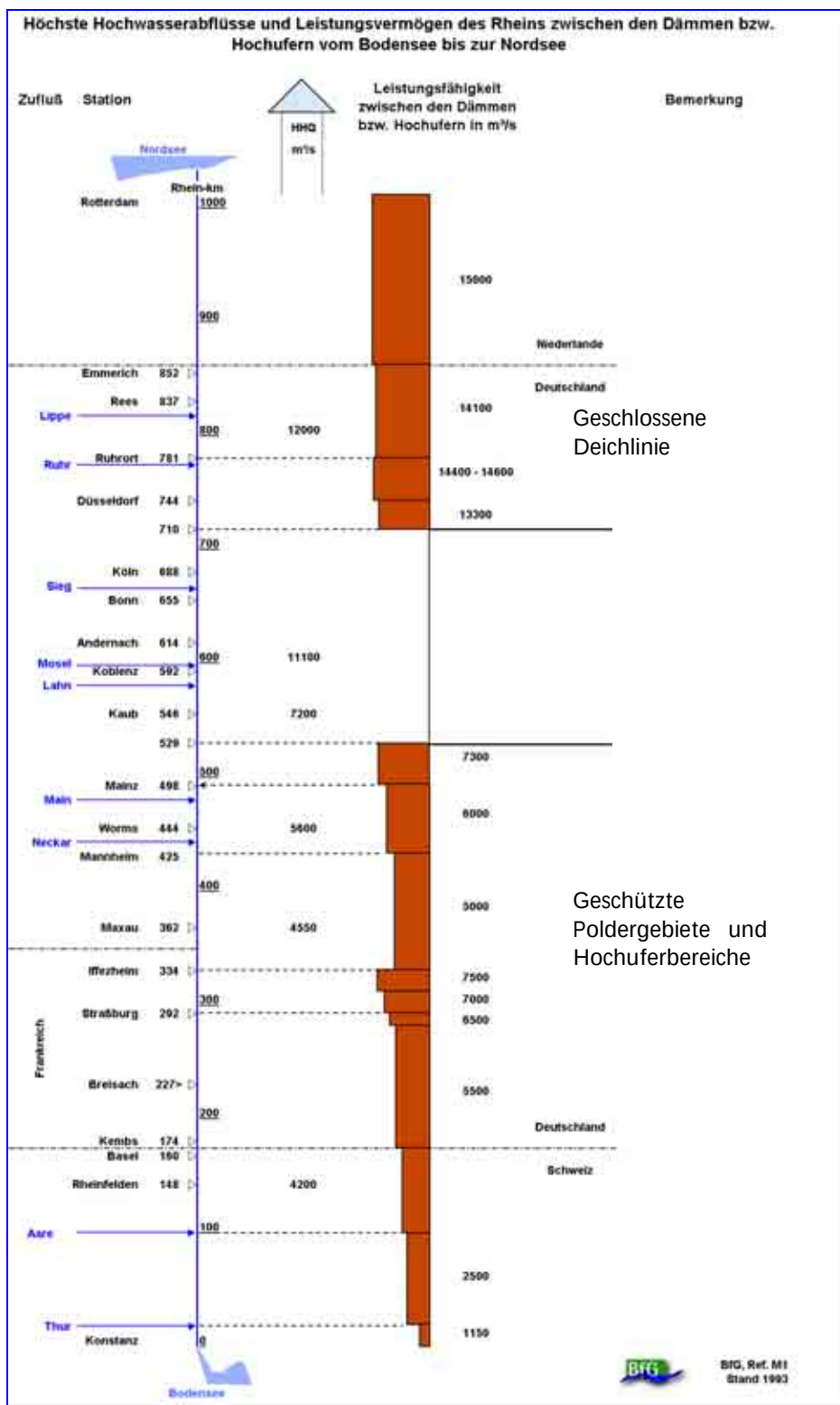
Met *afvoervermogen* wordt hierna de waterhoeveelheid in m^3/s bedoeld die afgevoerd kan worden als het waterpeil in de rivier een niveau bereikt dat overeenkomt met de hoogte van de dijkkruin minus de waakhogte. Bij waterkeringen waarvan de hoogte overeenkomt met het maatgevende hoogwater is het afvoervermogen gelijk aan de maatgevende afvoer. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn. In Nederland is het afvoervermogen van de Rijn op veel plaatsen momenteel $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ terwijl de maatgevende afvoer $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit komt door het feit dat de dijken nog niet zijn aangepast aan de maatgevende afvoer die sinds 2001 geldt. Op andere plaatsen kan het afvoervermogen ook hoger zijn dan de maatgevende afvoer, bijvoorbeeld omdat de maatgevende afvoer is verlaagd en de dijken nog volgens de oude maatgevende afvoer werden aangelegd, of omdat de rivier bij een gelijke waterstand meer water kan afvoeren.

De *afvoercapaciteit* is het afvoervermogen verhoogd met de afvoer die aanvullend in het bereik van de waakhogte kan worden afgevoerd.

2.3.2 Huidige toestand in het onderzoeksgebied: een overzicht

Over het algemeen neemt de afvoer langs de Rijn vanaf de oorsprong tot de eerste vertakking bij Pannerden toe. Dit geldt ook voor de topafvoeren van een hoogwater. Als men zich over het gehele traject van de Rijn in gelijke mate, d.w.z. met hetzelfde beschermingsniveau (over het algemeen uitgedrukt met afvoer respectievelijk waterpeil met een vooraf bepaalde waarschijnlijkheid) tegen hoogwater zou willen beschermen, dan zou men het *afvoervermogen* tussen de dijken in stroomrichting moeten verhogen. Figuur 2-3 geeft een overzicht van de ontwikkeling van het afvoervermogen langs de Rijn. Duidelijk wordt dat het afvoervermogen langs de Rijn niet altijd toeneemt. Het afvoervermogen vanaf de Bodensee tot Iffezheim neemt bijvoorbeeld toe van $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, om daarna benedenstrooms van het met stuwen geregelde gedeelte bij Iffezheim naar $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ af te nemen en vervolgens tot

de plaats waar de rivier in de Mittelrhein overgaat (Rijn-km 529) opnieuw naar 7300 m³/s toe te nemen. Op de Niederrhein varieert het afvoervermogen tussen 6500 m³/s bij Bad Honnef (Rijn-km 640) en 12900 m³/s in het gebied bij Köln, om in Nederland uiteindelijk 15000 m³/s te bereiken.



Figuur 2-3: De huidige hoogwaterbescherming langs de Rijn; stand van zaken per 1993 (volgens Eberle et al, 2004) (definitie afvoervermogen zie tekst).

Als men herhalingstijden toekent aan de met het afvoervermogen corresponderende afvoeren, dan blijken ook deze zogeheten herhalingsfrequenties te variëren van 1 keer per 1000 jaar (1/1000) tot 1 keer per 110 jaar (1/110) op de Oberrhein en minder dan 1/100 via 1/200 tot 1/500 jaar op de Niederrhein. In Nederland komt het huidige afvoervermogen van 15000 m³/s overeen met een herhalingsfrequentie van 1/585 jaar. Pas als de waterstandreducerende maatregelen in het kader van de PKB Ruimte voor de Rivier zijn gerealiseerd, zal met een afvoervermogen van 16000 m³/s de vereiste bescherming met een herhalingsfrequentie van 1/1250 jaar worden bereikt.

De afvoercapaciteit is het afvoervermogen, verhoogd met de afvoer die aanvullend in het bereik van de waakhoogte kan worden afgevoerd. Door de lokale geometrie van de rivier verschilt de extra afvoer van plaats tot plaats. Voor de Oberrhein benedenstrooms van Iffezheim gaat men over het algemeen uit van een extra afvoer van 300 m³/s (Eberle et al., 2004). Op de Niederrhein neemt deze extra afvoer per 1 m waakhoogte toe van ca. 1900 m³/s bij Keulen via ca. 2000 m³/s bij Düsseldorf, ca. 2300 m³/s bij Ruhrort, ca. 2700 m³/s bij Wesel tot ca. 3000 m³/s in het Duits-Nederlandse grensgebied van Rees tot Lobith.

Terwijl in Duitsland de waterkeringen erop zijn ingericht om nog stand te houden als de waterstand de kruinhoogte bereikt, gaat men er in Nederland vanuit dat de waterkeringen al bij het bereiken van de waterstand behorende bij de maatgevende afvoer kunnen falen. Dit is al te zien aan de opbouw van de dijken. In de voorliggende studie blijft dit verschil echter buiten beschouwing, d.w.z. dat ervan wordt uitgegaan dat er zowel in Duitsland als in Nederland een dijkdoorbraak zal plaatsvinden als het water over de kruin van de dijk stroomt.

2.3.3 Huidige en toekomstige toestand in het studiegebied

In Nordrhein-Westfalen beschermen waterkeringen met een lengte van ca. 330 km een gebied van ongeveer 1500 km² met ca. 1,4 miljoen mensen, industrie, infrastructuur en landbouwarealen. Het gaat hierbij om dijken, keermuren, damwanden en mobiele beschermingsmaatregelen. Bijlage 1-1 geeft een overzicht.

In NRW zijn de Duitse Deichverbände en de gemeenten in eigen beheer verantwoordelijk voor de bescherming tegen hoogwater. De deelstaat heeft tot taak om aanbevelingen te doen voor de dimensionering van de waterkeringen, toezicht te houden op de verantwoordelijke dijkinstanties, deze bij het plannen en het aanleggen van de maatregelen te adviseren en financiële steun te verlenen. In de praktijk gebeurt dit laatste pas als men de aanbevelingen opvolgt.

Dimensionering van de waterkeringen langs de Rijn in NRW

In het Regierungsbezirk Köln geldt momenteel het in 1963 uitgewerkte "Rahmenplan für den Hochwasserschutz" als basis voor de dimensionering van de waterkeringen. Hierin werd het waterpeil voor de verhoging vastgesteld op 1 m boven het hoogwaterpeil van 1925/1926. Bij meetstation Köln komt dit overeen met een afvoer van 13300 m³/s, waaraan destijds op grond van statistische analyses een herhalingsfrequentie van 1/1000 jaar werd toegekend (Schneider, 1996). Als waakhoogte voor de dijken werd volgens dit plan doorgaans 0,50 m gekozen, wat echter vaak niet werd gerealiseerd (mondeling meegedeeld door de heer Schaa, Staatliches Umweltamt Köln).

In het Regierungsbezirk Düsseldorf geldt momenteel nog de in 1977 vastgestelde maatgevende afvoer van BHQ_{77} voor de dimensionering van de waterkeringen (Schneider, 1996). Daarbij werden aan de belangrijkste meetstations langs de Niederrhein de volgende maatgevende afvoeren toegekend:

Köln en Düsseldorf	13300 m ³ /s
Ruhrort	14400 m ³ /s
Wesel	14600 m ³ /s
Rees	14200 m ³ /s
Emmerich	14100 m ³ /s

Gebaseerd op verscheidene statistische analyses ging men er indertijd vanuit dat de afvoer van de genoemde meetstations Köln en Düsseldorf overeenkomt met een herhalingsfrequentie van 1/1000 jaar. Omdat de tijdreeksen die ten grondslag liggen aan de huidige statistische analyses ook de hoogwaters van 1993 en 1995 bevatten, komt de genoemde afvoer vandaag de dag overeen met een herhalingsfrequentie van 1/300 jaar. Tegelijkertijd bedraagt deze afvoer het 1,2-voudige van de topafvoer van het hoogwater in 1925/1926. Voor de meer stroomafwaarts gelegen delen van de Niederrhein gaven de toenmalige studies echter tegenstrijdigheden te zien ten aanzien van de afvoerkrommen, zodat hier voor de maatgevende afvoer een afvoer werd vastgelegd waarbij de topafvoer van 1925/1926 over het algemeen met 20% werd verhoogd. In het kader van het dijkversterkingsprogramma werd aan de verantwoordelijke instanties voor de hoogwaterbescherming het dijkprofiel aanbevolen dat door het Staatliche Umweltamt Krefeld is ontwikkeld. Dit voorziet in een waakhoogte van 1 meter. Op dit moment is deze maatvoering nog niet ononderbroken over de hele lengte gerealiseerd.

In september 2003 heeft het MUNLV-NRW in Düsseldorf aan de districtsbesturen van het Regierungsbezirk Düsseldorf en het Regierungsbezirk Köln een nieuw voorstel *Bemessungshochwasser für den Rhein in NRW* voorgelegd m.b.t. een herziening van de maatgevende afvoer in NRW (MUNLV-NRW, 2003). Volgens dit voorstel moeten de waterkeringen *in de toekomst* worden berekend op basis van de in Tabel 2-3 weergegeven maatgevende afvoeren voor de meetstations Bonn tot Emmerich. De overgang van een hoogwaterbescherming met een herhalingsfrequentie van 200 jaar naar een bescherming van 500 jaar moet daarbij in het gebied van Rijn-km 771 (Duisburg/Krefeld) komen te liggen.

Tabel 2-3: Maatgevende afvoeren in NRW en Gelderland, geplande toestand in 2020 (volgens MUNLV-NRW 2003).

Meetstation	Herhalings-frequentie [jaren]	Q [m ³ /s]	Geldig voor riviertraject [Rijn-km]	
			van	tot
Bonn	200 ^D	12000	639,3	659,3
Köln	200 ^D	12900	659,3	703,3
Düsseldorf	200 ^D	12900	703,3	ca. 771
	500 ^D	14200	ca. 771	780,1
Ruhrort	500 ^D	14800	780,1	797,7
Wesel	500 ^D	14800	797,7	814,4
Rees	500 ^D	14700	814,4	ca. 823
			ca. 823	844,4
Emmerich	500 ^D	14500	844,4	865,5/857,7
Lobith	1250 ^{NL}	16000	865,5/857,7	

Als basis voor de berekening van de maatgevende waterstanden dient te worden uitgegaan van de resultaten van de waterstandberekeningen langs de Rijn in NRW volgens de berekeningen van de BfG (Busch et al., 1994). Als waakhoogte bij aarden dijken moet in principe 1,0 m worden gehanteerd. Bij dijken die direct door mijnzakking worden getroffen dient deze hoogte 1,5 m te zijn (MUNLV-NRW, 2003). Niet expliciet genoemd, maar in de praktijk gebruikelijk, is een waakhoogte van 0,1 tot 0,5 meter bij keermuren.

In *Nederland* geldt voor de Nederlandse Rijntakken sinds 1977 wettelijk een beschermingsniveau van 1/1250 jaar. Sinds 2001 komt dit overeen met een afvoer van 16000 m³/s bij Lobith. Daarvoor was dit 15000 m³/s. De vereiste verhoging van het afvoervermogen zou niet door dijkverhogingen maar door waterstandreducerende maatregelen (uiterwaardenverlaging, dijkteruglegging enz. in het kader van de PKB Ruimte voor de Rivier) en retentiemaatregelen moeten worden bereikt. De hoogte van de dijken moet gelijk blijven. De waakhoogte bedraagt 0,5 meter.

De *waterstanden voor de maatgevende afvoer die voor de waterkeringen* op deze basis zijn bepaald, worden in Bijlage 1-3 weergegeven. Deze worden afgezet tegenover de *hoogte van de waterkeringen* en de hoogte van waterkeringen minus de vereiste waakhoogte, zowel voor de huidige toestand als voor de toestand na de versterking van de waterkeringen.

Voor het eerste traject van de Rijn tot ongeveer Rijn-km 715 blijkt uit Bijlage 1-3 dat er in de huidige situatie geen doorlopende waterkering bestaat. Voor een groot deel wordt dit veroorzaakt door het grotere bodemreliëf en een smaller dal (gebieden met hoge oevers). Bovendien wordt principieel ook voor de beschermde gebieden (wat de waakhoogte betreft) een lager beschermingsniveau geboden dan in de meer stroomafwaarts gelegen delen van de Rijn. Doorgaans ligt dit beneden HQ₁₀₀.

In vergelijking tot de huidige situatie zal de bescherming na de uitvoering van de dijkversterking over het geheel genomen zijn verbeterd. De oppervlakte van de beschermde gebieden neemt toe (bijvoorbeeld door een gesloten beschermingslinie op de linkeroever van de Rijn vanaf Rijn-km 673). Op veel plaatsen worden de dijken en keermuren aangepast en worden ontbrekende schakels in de waterkering gedicht. Desondanks blijft een beschermingsniveau, gerelateerd aan een waakhoogte van 1 respectievelijk 0,5 meter met HQ₇₀ tot HQ₁₅₀, duidelijk beneden het beschermingsniveau dat meer benedenstrooms langs de Niederrhein is gerealiseerd respectievelijk gepland. Uitgaande van de in het Regierungsbezirk Köln bij keermuren vaak gehanteerde waakhoogte van 10 tot 20 cm is hier sprake van een hoogwaterbescherming die ligt tussen 1/100 en 1/200.

In het tweede traject (Bijlage 1-3, Rijn-km 715 tot ongeveer 768) begint op de linker Rijnoever vanaf ongeveer Rijn-km 705 respectievelijk op de rechter Rijnoever vanaf Rijn-km 722 de gesloten dijklinie in NRW, die slechts in uitzonderingsgevallen door stukken met hoge oevers wordt onderbroken.

In de huidige situatie beantwoordt een groot deel van dit traject al aan de toekomstige eisen voor de waterkeringen. Langs andere delen van de rivier (vooral tussen Rijn-km 723 en 727 van zowel de linker als de rechter Rijnoever) wordt, gelet op een waakhoogte van 1 meter voor dijken en 0,5 meter voor keermuren, het nagestreefde niveau van HQ₂₀₀ op dit moment nog niet bereikt. De dijkkrui ligt echter doorgaans op een waterstandniveau van HQ₂₀₀ en HQ₅₀₀.

Door de dijkversterkingen op de linker Rijnoever in Düsseldorf (ongeveer tussen Rijn-km 745 en 768) en op de rechter Rijnoever bovenstrooms van Düsseldorf

(tussen Rijn-km 723 en 727) wordt, eveneens uitgaande van een waakhogte van 1 respectievelijk 0,5 meter, ook in dit gedeelte het nagestreefde beschermingsniveau bereikt. Andere delen, vooral op de linker Rijnsoever tussen Rijn-km 727 en 745, houden hun lage beschermingsniveau. De dijkkrui ligt echter hoger dan HQ_{200} .

In de huidige toestand valt op de linker Rijnsoever bij Rijn-km 768 een duidelijke verhoging van de dijkkrui waar te nemen. Vanaf hier tot Rijn-km 820 liggen de waterkeringen ook minus een waakhogte van 1 meter voor dijken en 0,5 meter voor muren zowel op de linker als de rechter Rijnsoever voornamelijk boven het waterstandniveau van HQ_{500} . In dit door mijnzakkingen getroffen gebied springt vooral het onrustige verloop van de dijkkrui in het oog.

In de toestand 2020 is het hoogteverschil van de dijkkrui duidelijk gelijkmatiger. Behalve aan de dijkversterkingen is dit toe te schrijven aan het feit dat de nu nog hogere dijken in de door mijnzakkingen getroffen gebieden vóór het jaar 2020 de nagestreefde hoogte zullen bereiken.

Zowel op de linker als de rechter Rijnsoever wordt in het gehele Rijntraject tussen Rijn-km 768 en 810, uitgaande van een verhoogde waakhogte van 1,5 meter, ook het nagestreefde beschermingsniveau van HQ_{500} bereikt.

In het laatste traject, vanaf Rijn-km 810 tot aan de Duits-Nederlandse grens, wordt het nagestreefde niveau van 1/500 momenteel op sommige plaatsen slechts bereikt met waakhogten beneden 1 respectievelijk 0,5 meter.

Door de lopende dijkversterkingsmaatregelen kan in de toekomst de gewenste bescherming tegen hoogwater worden gewaarborgd. De enige uitzondering vormt Emmerich, waar voor de plaatselijke keermuur rekening wordt gehouden met een waakhogte van slechts 40 cm. Bij de dimensionering van deze waterkering wordt ervan uitgegaan dat bodemerosie in dit gedeelte van de rivier voor 2020 tot een daling van de waterstand met 10 cm zal leiden.

In Nederland kunnen de waterkeringen in het gebied dicht bij de grens op dit moment al het nagestreefde maatgevende hoogwater afvoeren, met behoud van de gewenste waakhogte. Om dit ook over de gehele lengte van de Rijntakken te waarborgen wil men de dijken voor 2015 niet verhogen, maar wil men het hydraulische afvoervermogen van de rivier vergroten.

Op basis van de maatgevende afvoeren en de bij ieder meetstation geldende afvoercapaciteit per meter waterstand in het bovenste deel van de afvoerkromme kan een *eerste schatting van de totale afvoercapaciteit* worden gemaakt, zowel voor de huidige toestand in 2002 (Tabel 2-4) als voor de toekomstige toestand in 2020 (Tabel 2-5). Zoals Bijlage 1-3 en de bovenstaande toelichtingen illustreren, wijken de dijkhoogten plaatselijk echter duidelijk af van de standaarden, zodat vooral ten aanzien van toestand 2002 sprake is van theoretische waarden voor de globale schatting van de afvoercapaciteit. Nader onderzoek naar de afvoercapaciteit in het studiegebied is een van de meest essentiële taken van het project.

Tabel 2-4: Globaal geraamde afvoercapaciteiten in NRW en Gelderland, huidige toestand van 2002; theoretische waarden uitgaande van de aanname dat BHQ₇₇ met de genoemde waakhooften wordt gerealiseerd.

Meetstation	Maatgevende afvoer conform BHQ [m³/s]	Extra capaciteit door 1 m waakhooft [m³/s]	Totale capaciteit bij	
			0,5 m waakhooft [m³/s]	1 m waakhooft [m³/s]
Köln	13300	1900	14250	15200
Düsseldorf	13300	2000	14300	15300
Ruhrort	14400	2300	15550	16700
Wesel	14600	2700	15950	17300
Rees	14200	3000	15700	17200
Emmerich	14100	3000	15600	17100
Lobith	15000	3000	16500	--- ¹⁾
1) niet relevant				

Tabel 2-5: Globaal geraamde afvoercapaciteiten in NRW en Gelderland, geplande toestand in 2020, theoretische waarden na realisering van het nagestreefde beschermingsniveau met de vermelde waakhooften.

Meetstation	Maatgevende afvoer		Extra capaciteit door 1 m waakhooft [m³/s]	Totale capaciteit bij		
	Frequentie [jaren]	Afvoer [Q]		0,5 m waakhooft [m³/s]	1 m waakhooft [m³/s]	1,5 m waakhooft [m³/s]
Bonn	200 ^D	12600	1900	13550	14500	--- ¹⁾
Köln	200 ^D	12900	1900	13850	14800	--- ¹⁾
Düsseldorf	200 ^D	12900	2000	13900	14900	--- ¹⁾
	500 ^D	14200	2000	15200	16200	17200
Ruhrort	500 ^D	14800	2300	15950	17100	18250
Wesel	500 ^D	14800	2700	16150	17500	18850
Rees	500 ^D	14700	3000	16200	17700	19200
Emmerich	500 ^D	14500	3000	16000	17500	--- ¹⁾
Lobith	1250 ^{NL}	16000	3000	17500	--- ¹⁾	--- ¹⁾
D: Duitse statistiek				1) niet relevant		
NL: Nederlandse statistiek						

2.3.4 Toekomstige toestand in het onderzoeksgebied stroomopwaarts van NRW

In de voorliggende studie wordt ervan uitgegaan dat in het stroomgebied van de Rijn stroomopwaarts van Nordrhein-Westfalen de dijkhoogten en dus ook het afvoervermogen en de afvoercapaciteiten niet zullen veranderen. Door realisering van de hoogwaterreducerende maatregelen op de Oberrhein zal de herhalingsfrequentie van de afvoervermogens die worden genoemd voor het gedeelte stroomafwaarts van Iffezheim (Rijn-km 334 tot 529) vóór 2020 naar 1/200 jaar dalen.

2.4 Hoogwaterreducerende maatregelen

2.4.1 Hoogwaterreducerende maatregelen in het stroomgebied tot Andernach

In het gehele stroomgebied van de Rijn tot Andernach worden al geruime tijd in toenemende mate maatregelen getroffen om de waterstanden bij hoogwater te reduceren. In het kader van deze studie wordt bij deze maatregelen alleen expliciet rekening gehouden met de ingrepen langs de Oberrhein. Deze maatregelen hebben tot doel om de door de aanleg van stuwen veroorzaakte effecten op de topwaterstanden bij hoogwater zodanig te compenseren, dat een hoogwater met een herhalingsfrequentie van 200 jaar, stroomafwaarts van het aangelegde tracé tot aan de Neckar, weer met een afvoer van 5000 m³/s verloopt en tussen de mondingen van de Neckar en de Main met een topafvoer van 6000 m³/s. Tabel 2-6 toont een overzicht van deze maatregelen.

Tabel 2-6: Retentiemaatregelen op de Oberrhein (vergelijk ook Bijlage 2-1 en Bijlage 2-2) (volgens Eberle et al., 2004).

Rijn-km	Maatregel [naam]	Maatregel [type]	Retentie-volume [miljoen m³]	Stand van realisatie zomer 2002	Maatregel meegerekend bij de berekeningen van de systeemtoestand?	
					2002	2020
174 – 274	aangepast gebruik waterkrachtcentrales ¹⁾	Rijnzijkanaal en 3 (van 4) bochten	~12-45	gerealiseerd	X	X
220,0	zuidelijke. stuw Breisach	stuw of UWV	25,0	voorstudie		X
225,0	Stuw Breisach	Stuw	9,3	voorstudie		X
235,0	Breisach/Burkheim	RP st	6,5	voorstudie		X
246,0	Wyhl/Weisweil	RP st	7,7	voorstudie		X
253,5	monding v.d. Elz	RP st	5,3	voorstudie		X
275,0	Erstein	RP st	7,8	in uitvoering		X
276,0	Ichenheim/Meisenheim	RP st	5,8	voorstudie		X
280,0	Altenheim	RP st	17,6	gerealiseerd	X	X
285,0	Stuw Straßburg/Kehl ²⁾	Stuw	37,0	gerealiseerd	X	X
308,0	Freistett	RP st	9,0	voorstudie		X
321,0	Söllingen/Greffern	RP st	12,0	in uitvoering		X
330,0	Moder	RP st	5,6	gerealiseerd	X	X
345,5	Bellenkopf/Rappenwörth	RP st	14,0	voorstudie		
359,0	Daxlander Au	RP st	5,1	gerealiseerd	X	X
368,0	Neupotzh/Wörth	DTL en RP st	16,2 (12 + 4,2)	bestemmingsplanprocedure		X
381,3	Elisabethenwörth	RP st	11,9	bestemmingsplanprocedure		X
388,4	Mechtersheim	RP st	7,4	voorstudie		X
390,4	Rheinschanzinsel	RP st	6,2	bestemmingsplanprocedure		X
392,6	Flotzgrün	RP st	5,0	gerealiseerd	X	X
409,9	Kollerinsel	RP st	6,1	gerealiseerd	X	X
411,5	Waldsee/Altrip/Neuhofen	DTL en RP st	9,1 (7,9 + 1,2)	voorstudie		X
436,0	Petersau/Bannen	DTL	1,4	voorstudie		X
438,0	Worms Bürgerweide	DTL	3,4	gerealiseerd	X	X
440,0	Worms Mittlerer Busch	DTL	2,3	in uitvoering		X
490,0	Bodenheim/Laubenheim	RP st	6,4	voorstudie		X
517,0	Ingelheim	RP st	3,8	voorstudie		X
UWV = uiterwaardenverlaging DTL = dijkteruglegging RP st = retentiepolder met stuurbare overlaat		1) maximumvolume, ingezet volume is afhankelijk van de afvoer in de Rijn. 2) op dit moment (2002) slechts ongeveer 12 miljoen m³ beschikbaar. In noodsituaties kan echter het maximale volume worden ingezet.				

2.4.2 Hoogwaterreducerende maatregelen langs de Niederrhein

Ook langs de Niederrhein werd en wordt in waterstandreducerende maatregelen geïnvesteerd. Behalve kleinschalige dijkterugleggingen en het verwijderen van hydraulische knelpunten zijn de volgende 11 maatregelen gepland of al gerealiseerd.

Tabel 2-7: Retentiemaatregelen op de Niederrhein (vergelijk ook Bijlage 2-3) (volgens Van der Veen et al., 2004a en Mehlig, 2004).

Naam	km boven	km onder	Oe- ver	Variant	Type	Retentie- opp. [ha]	Retentie- volume [milj. m³]	Maatregel meegerekend bij de berekening van de systeemtoestand? ¹⁾	
								2002	2020
Köln-Landael	668.5	673.5	R	BPV	RP O	158	4.53	X ³⁾	X
Worringer Bruch	705,5	708,5	L	PV-V1	RP O	710	29,5		
				PV-V2	RP O	250	8,3		
				PV-V3 ²⁾	RP st	710	29,5	X	X
				PV-V4	RP st	250	8,3		
Monheim	707,5	713,5	R	UV	DTL LD	185	8		X
Itter-Himmelgeist	723,5	727,5	R	PV-2A	DTL	58	-		X
				PV-3A	DTL	113	-		
Ilvericher Bruch	750	754,5	L	PV-A	RP st	270	7,5		
				PV-AA	RP st	290	8,1		
				PV-B1	RP st	450	10,4		
				PV-B2	RP st	270	8,4		X
Mündelheim	760,5	769,5	R	PV-V4	DTL	64	-	X ³⁾	X
Orsoy Land	797,5	803,5	L	UV	DTL LD	215	-	X	X
Bislicher Insel	818,5	823,5	L	UV	RP O	960	50	X ³⁾	X
Lohrwardt	827,8	834,8	R	BPV	RP O	287	17,35	X	X
Griether Busch	837,5	847,5	R	PV	RP O	1200	25		X
Bylerward	845,5	854,5	L	PV-A1	DTL	235	8		
				PV-A1/C	DTL UWV	235	8		
				PV-A2	DTL	60	2		
				PV-B1	RP st	870	10		
				PV-B1A	RP st	1110	21		
				PV-B2	RP st	1150	51		
				PV-B3	RP st	1200	52		X
				PV-B4	RP st	1430	62		
				PV-C	UWV	392	8		
PV:	planningsvariant (evt. met variantnaam uit de plandocumenten)				RP st :	retentiepolder met stuurbare overlaat			
BPV:	bestemmingsplanvariant				RP O:	retentiepolder met vaste overlaat (ongestuurd)			
UV:	uitvoeringsvariant				DTL:	dijkteruglegging			
					DTL LD:	dijkteruglegging met leidam			
					UWV:	uiterwaardverlaging			
¹⁾ Indien er meer (plannings-) varianten van een maatregel worden vermeld, is dit de variant die in het DSS-model voor het scenario „NRW“ is gebruikt.									
²⁾ Volgens informatie van StUA Köln geactualiseerde geometrie van variant V3.									
³⁾ In het scenario 2002 is vanwege de goede vorderingen van de planning en de aanleg al rekening gehouden met het effect van de maatregel.									

Door de water- en scheepvaartautoriteiten in de Bondsrepubliek Duitsland, respectievelijk de deelstaat Nordrhein-Westfalen zijn bovendien nog andere maatregelen (rivierverruiming, verwijderen van hydraulische knelpunten, kleinere dijkverleggingen) voor de reducering van de waterstand gepland, zoals:

- *Reeser Schanz* (Rijn-km 834 tot 838, verwijderen van de dwarsdam tegenover Obermömter en aanleg van een hoogwatergeul),
- Verbreding van het doorstroomprofiel bij de *brug van Wesel* (Rijn-km 813 - 814),
- Verwijderen van *hydraulische knelpunten bij Bislicher Insel*
 - Verwijderen van 2 dwarsdammen, linkeroever, Rijn-km 820,8 en 821,7
 - Verwijderen Postdeich, rechter Rijnsoever, Rijn-km 821,4
 - Verwijderen helling café-restaurant Rose, rechteroever, Rijn-km 820,8
 - Verwijderen dwarsdam Melkstall, rechteroever, Rijn-km 824,8.

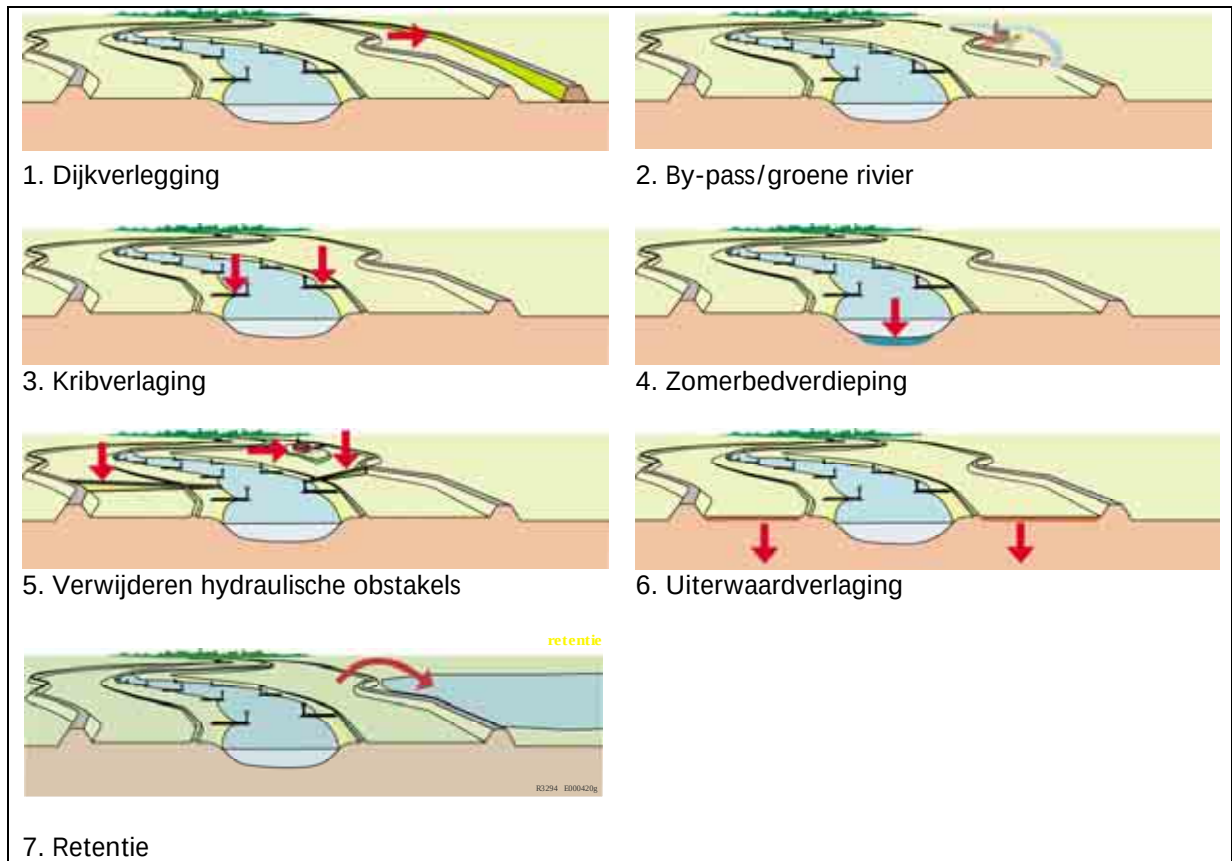
Deze maatregelen worden in Tabel 2-7 niet genoemd, maar als extra maatregelen wordt hiermee in het kader van dit onderzoek rekening gehouden. Hetzelfde geldt voor de retentiepolder Orsoyer Bogen (bij Rijn-km 802 tot 804,8) waarvoor tot nu toe nog geen plannen zijn gemaakt.

2.4.3 Hoogwaterreducerende maatregelen in Nederland

Op dit moment kan in de Nederlandse Rijntakken een afvoer van 15000 m³/s bij Lobith veilig worden afgevoerd. In 2001 werd de maatgevende afvoer als gevolg van de hoogwaters van 1993 en 1995 verhoogd naar 16000 m³/s. Het is een algemeen aanvaard doel om deze extra afvoercapaciteit - indien mogelijk - niet door het verhogen van de dijken te bewerkstelligen, maar door waterstandreducerende maatregelen. Tussen 1997 en 2004 zijn daarom uitgebreide onderzoeken gedaan om de mogelijke maatregelen en hun effecten nader te bepalen. In hoofdzaak betreft het hier de typen maatregelen die in Figuur 2-4 zijn weergegeven. De maatregelen 5 tot en met 7 zullen worden ingezet indien er nog hogere afvoeren dan 16000 m³/s zouden ontstaan, bijvoorbeeld als gevolg van de klimaatveranderingen.

In het kader van de PKB Ruimte voor de Rivier bevindt men zich momenteel in de fase van het plannen en implementeren van concrete maatregelen. Om dit proces en de bijbehorende discussie te ondersteunen, werd een instrument ter visualisering ontwikkeld dat alle mogelijke maatregelen, inclusief hun effecten, als bouwstenen omvat. Met behulp van deze bouwstenen (ongeveer 600 stuks) kunnen de verschillende maatregelen en hun effecten worden gecombineerd en opgeteld. Het instrument wordt daarom ook wel de “blokkendoos” genoemd.

In Nederland is zodoende bekend welk totale effect er met behulp van de waterstandreducerende maatregelen moet worden nagestreefd. De maatregelen zelf zijn echter nog niet bepaald.



Figuur 2-4: Maatregeltypen in het kader van „Ruimte voor de Rivier“ in Nederland (bron: Silva et al., 2000).

3 Methode

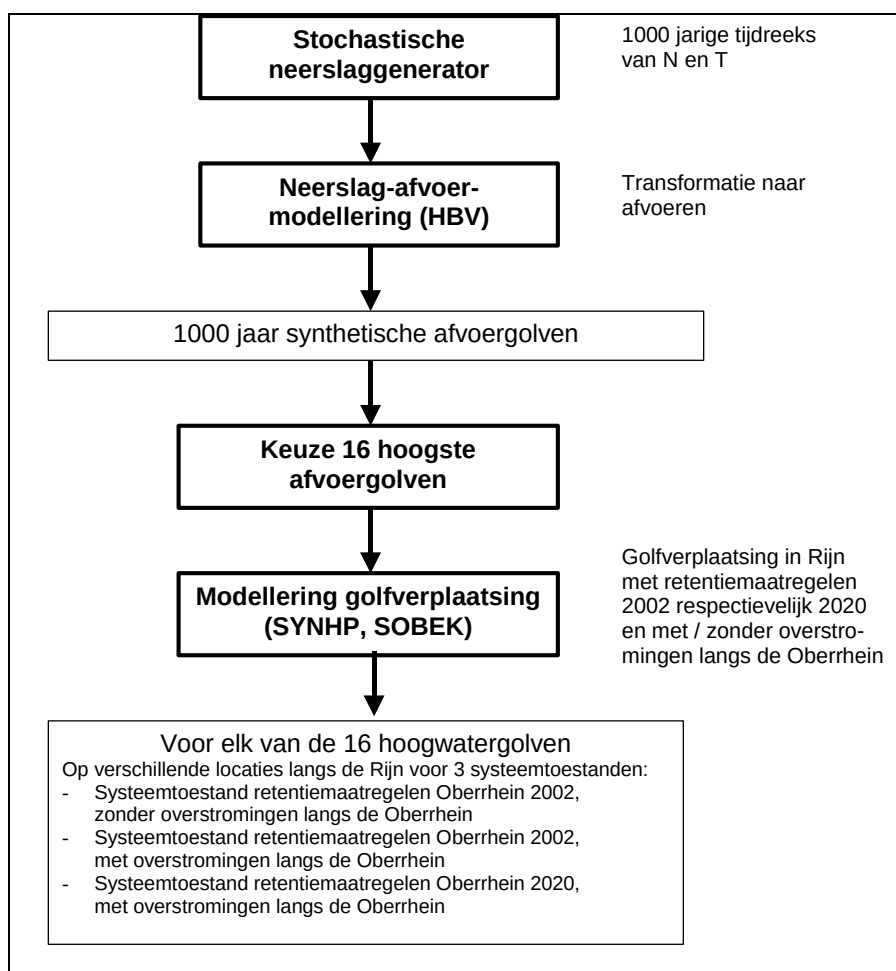
3.1 Modelling extreme afvoeren uit het stroomgebied van de Rijn

De ervaring leert dat er in het stroomgebied van de Rijn altijd weer situaties met hoogwater voorkomen. De mens heeft hierop gereageerd met de aanleg van waterkeringen. Hierbij komt men voor de vraag te staan op welke afvoeren en waterstanden men zich moet instellen.

Daarom moet duidelijk worden hoeveel water er in extreme omstandigheden uit het stroomgebied van de Rijn (bovenstrooms van het systeem *Duitse Niederrhein/Nederlandse Rijntakken*) kan worden verwacht. Hierbij moest zowel met de huidige als met de toekomstige omstandigheden ten aanzien van de retentiemaatregelen langs de Oberrhein en de eventuele klimaatveranderingen rekening worden gehouden.

De *beoordeling van extreme scenario's onder de gegeven klimatologische omstandigheden* is gebaseerd op de volgende onderdelen (zie ook Figuur 3-1):

1. een neerslaggenerator,
2. een neerslag-afvoermodellering (HBV)
3. hydrologische/hydraulische modellen voor de Rijn vanaf Basel en de benedenlopen van belangrijke zijrivieren.



Figuur 3-1: Aanpak bij de schatting van extreme afvoeren uit het stroomgebied.

De stochastische neerslaggenerator is een instrument om extreme meteorologische situaties te simuleren. Met behulp van de generator kunnen tijdreeksen met een willekeurige lengte van neerslag en temperatuur in het Rijngebied worden gegenereerd die statistisch met de historische gegevens overeenkomen.

De gegenereerde tijdreeksen vormen de invoer voor een neerslag-afvoermodel van het Rijngebied op dagbasis. Met dit model wordt de afvoer als gevolg van de gegenereerde neerslag in de zijrivieren en in de Rijn bij Basel berekend.

Met de waterbewegingsmodellen SYNHP en SOBEK worden met gesimuleerde afvoeren de resulterende afvoeren in de Rijn bij Andernach berekend. Hierbij wordt rekening gehouden met retentiemaatregelen en het overstromen van dijken.

Omdat de waterbewegingsmodellen op basis van uurwaarden functioneren en niet geschikt zijn voor continue simulaties over langere perioden, werden de afvoeren in de Rijn in eerste instantie globaal ingeschat met behulp van een eenvoudige methode voor het berekenen van het afvoerverloop. Uit de op deze manier berekende afvoergolven werden de 16 situaties gekozen die bij Andernach de hoogste topafvoeren opleverden. Deze situaties leverden ook de hoogste waarden op bij Lobith. Alleen deze situaties werden met de complexe waterbewegingsmodellen en met inbegrip van retentiemaatregelen en dijkoverstromingen doorgerekend.

Gedetailleerde informatie is te vinden in Eberle et al. (2004).

Er vonden berekeningen plaats voor het stroomgebied van de Rijn tot Lobith. Met de retentiemaatregelen en overstromingen werd echter alleen voor de Oberrhein rekening gehouden, omdat de resultaten bij Andernach maatgevend zijn voor de verdere berekeningen. Tabel 3-1 geeft een overzicht van de berekende systeemtoestanden in het systeem. In Tabel 2-6 is te zien met welke retentiemaatregelen rekening is gehouden.

Tabel 3-1: Berekende systeemtoestanden op de Oberrhein.

Systeemtoestand Oberrhein	Retentiemaatregelen op de Oberrhein	Overstromingen op de Oberrhein
OR-2002 ohne	toestand 2002	zonder
OR-2002 mit	toestand 2002	met
OR-2020 mit	toestand 2020	met

3.2 Selecteren geschikte afvoergolven

Om de afvoercapaciteit op de Niederrhein, evenals de mogelijke overstromingen op de Niederrhein bij het overschrijden van de afvoercapaciteit, en het effect van waterstandreducerende maatregelen nader te onderzoeken, werden in een volgende stap uit de 16 meest extreme afvoergolven in totaal 8 afvoergolven gekozen die aan de volgende criteria voldoen:

1. Om de gevolgen van de effecten van overstromingen als gevolg van falende dijken te onderzoeken zijn afvoergolven nodig waarbij één of meer waterkeringen op de Niederrhein overstroomt. In het kader van deze studie wordt er altijd van uitgegaan dat een waterkering alleen faalt als deze overstroomt. Andere vormen van falen blijven buiten beschouwing.
2. Om de afvoercapaciteit (d.w.z. de hoeveelheid die nog kan worden afgevoerd, zonder dat een dijk overstroomt) te bepalen, dient men te beschikken over afvoergolven met topstanden die liggen tussen de waterstand van de maatgevende afvoer en het overstromingsniveau.
3. Om de afvoercapaciteit te kunnen bepalen zijn bovendien afvoergolven nodig die iets beneden het niveau van de maatgevende afvoer liggen.
4. Om het effect te kunnen bepalen van de geplande en sinds 1995 gereedgekomen hoogwaterreducerende maatregelen zijn tot slot nog afvoergolven nodig waarvan de afvoertop binnen het effectbereik van deze maatregelen ligt.
5. In totaal moet m.b.t. de afvoergolven het gehele spectrum van topwaterstanden worden omvat dat ligt tussen het historische hoogwater van 1995 (na het hoogwater van 1925/26 het hoogste hoogwater op de Niederrhein sinds 1901) en de hoogste van de 16 gegenereerde hoogwatersituaties.

Bij de keuze van de afvoergolven werden daarom de huidige en de toekomstige maatgevende afvoeren betrokken en op basis van deze gegevens werd een globale schatting van de afvoercapaciteiten gemaakt (Tabel 2-4 en Tabel 2-5). Bovendien werd rekening gehouden met het aan de hand van de plandocumenten geschatte effectbereik van de waterstandreducerende maatregelen (Tabel 3-2).

Tabel 3-2: Bij het selecteren van de afvoergolven geschatte effectbereik van de hoogwaterreducerende maatregelen.

Riviertraject	Maatregelen	Toewijzing aan meetstation	Effectbereik [m ³ /s] ¹⁾	
			Ondergrens	Bovengrens
Niederrhein	Köln-Langel	Köln	10700	11000
	Köln-Worringen	Köln	9700	10000
	Monheim	Köln	5700	>5700
	Itter-Himmelgeist	Düsseldorf	6200	>6200
	Ilvericher Bruch	Düsseldorf	11000	12000
	Mündelheim	Ruhrort	5000	>5000
	Orsoy	Wesel	3800	>3800
	Bislicher Insel	Wesel	9000	>9000
	Lohrwardt	Rees	10000	11000
	Griether Busch	Rees	10000	> 10000
Boven-Rijn/Waal	Bylerward	Lobith	10400	12200
	Rijnstranden	Lobith	12200	16200
	Ooijpolder	Lobith	14000	15000

¹⁾ Cursieve en linksuitgelijnde getallen zijn de effectbereiken van maatregelen (zoals dijkerugleggingen, doorstroomde poldergebieden enz.) waarvoor géén bovengrens aangegeven kan worden.

3.3 Overstromingen op de Niederrhein

3.3.1 2D-modellering van overstromingen op de Niederrhein

Afvoeren die boven de afvoercapaciteit van de Rijn uitstijgen, kunnen op een of meer plaatsen overstromingen veroorzaken. Wat dit betreft zijn de volgende vragen relevant:

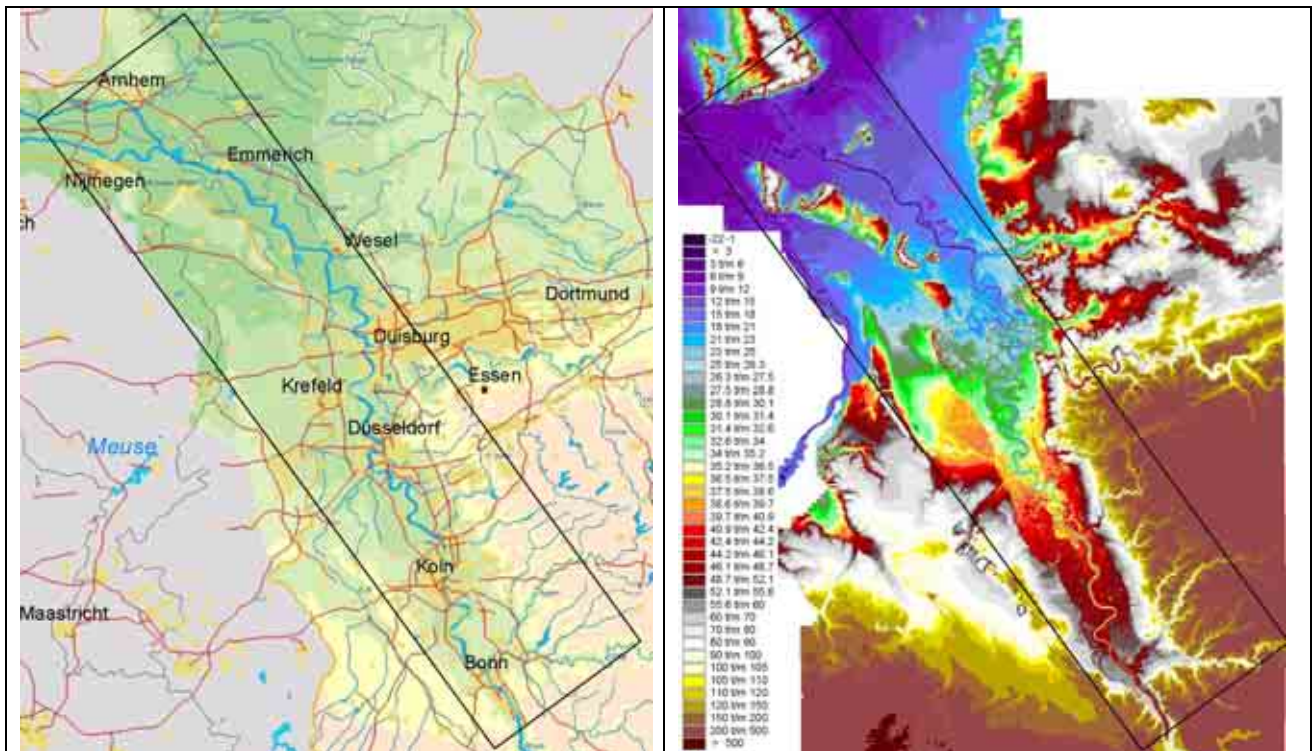
- Waar bevinden zich de kritieke punten voor een mogelijk falen van waterkeringen langs de Niederrhein en in Gelderland als gevolg van overstromingen, waarbij eventueel een dijkdoorbraak kan ontstaan?
- Welke gebieden komen daarbij onder water te staan, hoe snel gebeurt dit en hoe hoog staat het water?
- Hoe stroomt het water achter de dijken?
- Hoeveel water stroomt uit de rivier naar het gebied achter de dijk?
- Stroomt het water ook weer terug en zo ja, waar en hoeveel?
- Welk effect heeft dit op de afvoer in de Rijn?

Daarom is bij de Provincie Gelderland een tweedimensionaal overstromingsmodel ontwikkeld voor de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken vanaf Rijn-km 642 (12 km bovenstrooms van Bonn) tot Brummen aan de IJssel (IJssel-km 918), voor de stuw in de Neder Rijn bij Driel (Neder Rijn-km 891) en Ewijk aan de Waal (Waal-km 893) (Figuur 3-2). In het model wordt rekening gehouden met de zijrivieren Sieg, Erft, Ruhr, Emscher, Lippe en Oude IJssel. Het model is gebaseerd op een raster van 100 m x 100 m. In dit raster is de terreinhoogte weergegeven. Ook lijnelementen zoals dijken, keermuren, verhoogde wegen enz. moeten in dit raster zodanig worden opgenomen dat hun effect op het stromingsgedrag goed wordt weergegeven. Gudden (2004) en Van Mierlo et al. (2003) geven hierover uitvoerige informatie.

Bij de overstromingsberekeningen met DELFT-FLS werd principieel van twee systeemtoestanden uitgegaan: de toestand in 1995 en de toestand in 2020. Deze zijn in Tabel 3-3 samengevat.

Tabel 3-3: Systeemtoestanden op de Niederrhein voor de berekening van de overstromingen.

Systeemtoestand Niederrhein	Riviergeometrie en retentiemaatregelen op de Niederrhein	Dijkhoogten
1995	toestand 1995 ¹⁾	toestand 2002
2020	toestand 1995	toestand 2020 ²⁾
¹⁾ Identiek aan toestand 2002, zonder de in 2002 reeds gerealiseerde waterstandreducerende maatregelen op de Niederrhein (vergelijk ook Tabel 3-4 en Tabel 3-5).		
²⁾ Voor de toestand 2020 werden alleen dijkhoogten uit de database overgenomen die hoger waren dan respectievelijk gelijk waren aan de gegevens van de toestand 2002. Wanneer de gegevens voor de toestand 2020 lager waren dan die van de toestand 2002 dan werden de waarden van de toestand 2002 niet vervangen. Testberekeningen die achteraf werden uitgevoerd met de voor toestand 2020 in de database vermelde dijkhoogten toonden aan dat dit niet van invloed is op de resultaten (mondelinge mededeling van de heer Gudden, Provincie Gelderland in april 2004).		



Figuur 3-2: 2D-overstromingsmodel Delft-FLS, situatie- en hoogtemodel (bron: Gudden, 2004).

Voor het uitvoeren van de berekeningen werden de twee afvoergolven van de BfG uitgezocht die de hoogste topafvoeren bij Andernach opleveren voor de systeemtoestand in 2002 met dijkoverstromingen langs de Oberrhein (OR-2002 mit). Dit waren tevens ook de grootste hoogwatersituaties bij Lobith. Met behulp van deze twee afvoergolven (HW158mitDueb en HW824mitDueb) werden berekeningen voor de systeemtoestanden 1995 en 2020 op de Niederrhein uitgevoerd (zie ook Tabel 3-4). Om technische redenen moesten de berekeningen aanvankelijk worden uitgevoerd met als uitgangspunt dat alle dijken slechts zouden overstromen en niet zouden breken. Daarna moest vervolgens een dijkdoorbraak worden geïnitieerd op locaties waar het tot een overstroming van de dijken komt. Bij andere waterkeringen (vooral bij keermuren) en hooggelegen gebieden werd altijd van een overstroming uitgegaan.

In Delft-FLS wordt een dijkdoorbraak als volgt gedefinieerd:

- Als de waterstand in de rivier hoger is dan of gelijk is aan de dijkhoogte zal de dijk doorbreken.
- Aan het begin van de dijkdoorbraak is het gat 35 meter breed.
- Op de doorbraaklocatie wordt in eerste instantie binnen twee uur alleen de drempelhoogte lager. Deze daalt van dijkruinhoogte tot de hoogte van het omliggende terrein.
- Daarna wordt de breedte van de bres binnen 28 uur groter en verbreedt deze zich van 35 m tot 200 m volgens de volgende berekeningsformule: $\text{bresbreedte [m]} = 44.65 \cdot t^{0.45}$. Hierbij is t de tijd in uren, geteld vanaf het moment waarop de drempelhoogte de hoogte van het omliggende terrein heeft bereikt.

Daarnaast werden er ook berekeningen uitgevoerd met de afvoergolf HW158 zonder dijkoverstromingen langs de Oberrhein (HW158ohneDueb) en met de historische hoogwatergolf van 1995 (MET95). Tabel 3-4 geeft een overzicht.

Tabel 3-4: Scenario's voor de 2D-overstromingsberekeningen Niederrhein.

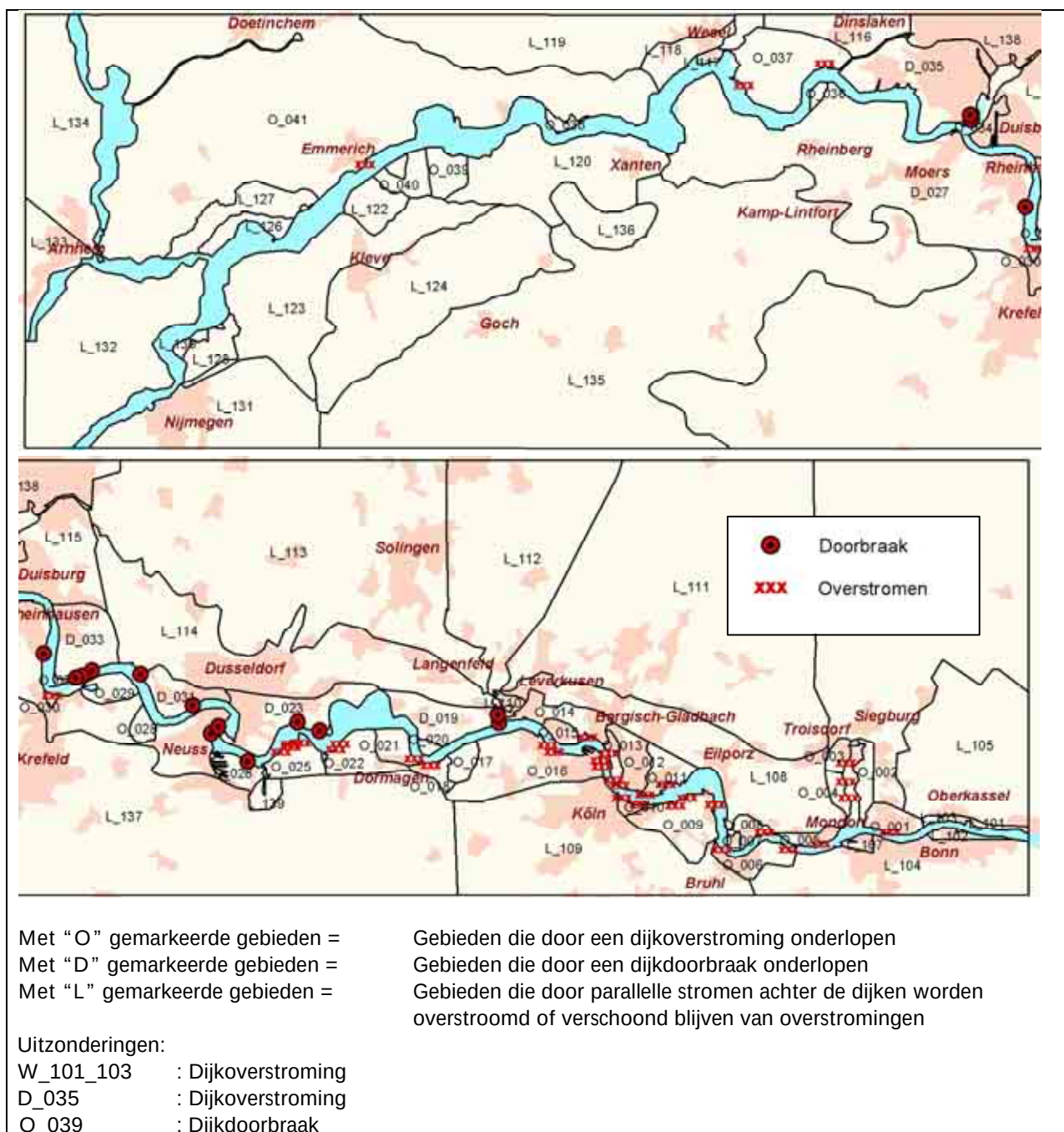
Scenario				Berekeningen 2D Delft-FLS			
2D Delft-FLS			1D SOBEK/DSS	Hoogwaterafvoergolf			code Delft-FLS
Naam	Toelichting		Naam	Naam	Toelichting		Naam
	Systeem- toestand Niederrhein	DÜ/DB ¹⁾			Systeem- toestand Oberrhein	HW- afvoer- golf	
1995_DB	1995	DB	1995_M	HW158mit Dueb	OR-2002 mit	HW158	N49
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P29
			---	<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M79</i>
2020_DB	2020	DB	2020_M	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N32
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P32
			---	<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M52</i>
1995_DÜ	1995	DÜ	---	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N09
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P09
				MET95 mitDueb	OR-2002 mit	HW1995	Z09
				<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M09</i>
2020_DÜ	2020	DÜ	---	HW158 mitDueb	OR-2002 mit	HW158	N02
				HW824 mitDueb	OR-2002 mit	HW824	P02
				<i>HW158 ohneDueb</i>	<i>OR-2002 ohne</i>	<i>HW158</i>	<i>M02</i>
¹⁾ DÜ = met dijkoverstroming op de Niederrhein DB = met dijkdoorbraak op de Niederrhein				vet = realistische scenario's <i>cursief</i> = scenario's met nog extremere afvoeren mitDueb / ohneDueb = met / zonder dijkoverstroming op de Oberrhein (vergelijk Tabel 3-1)			

Op basis van de resultaten uit deze berekeningen werd het gebied achter de dijken in SOBEK en het DSS geschematiseerd. Dit maakte uiteindelijk een gekoppelde modellering mogelijk van dijkoverstroming/dijkdoorbraak en afvoerverloop, met inachtneming van de waterstandreducerende maatregelen. Meer details zijn te vinden bij Gudden (2004).

3.3.2 Modellering overstromingen op de Niederrhein in een 1D-model (koppeling 1D-SOBEK/DSS-model met het 2D-Delft-FLS-model)

Het SOBEK-model (en daarmee ook het DSS) beschrijft slechts de rivier met zijn uiterwaarden tussen de dijken. In het voorliggende onderzoek moest echter het effect van de retentiemaatregelen worden onderzocht waarbij tegelijkertijd

rekening werd gehouden met overstromingen van het binnendijkse gebied. Daarom werden de kenmerkende hydraulische eigenschappen van de dijkoverstromingen respectievelijk dijkdoorbraken uit de 2-dimensionale (2D) overstromingsberekening gekwantificeerd en in het 1D-model ingebouwd. Daarbij wordt het gebied achter de dijken als een retentiegebied opgevat dat over een overlaatsdrempel wordt gevuld en geleegd. De drempelhoogte en -lengte worden zodanig bepaald en qua tijd veranderd dat de met SOBEK berekende toevoer- en afvoer met de bijbehorende toe- en afvoer uit DELFT-FLS overeenstemt. Ook het verloop van de waterstanden in de tijd en de geborgen waterhoeveelheid in het retentiegebied zou in beide modellen gelijk moeten zijn.



Figuur 3-3: Indeling van de overstromingsgebieden achter de dijken en van locaties waar de overstromingen van de waterkeringen respectievelijk een dijkdoorbraak werden berekend (volgens Gudden, 2004).

Daarom moesten allereerst in Delft-FLS zowel voor de huidige toestand van de dijken (1995/2002) als voor de toekomstige toestand (2020) de locaties worden bepaald waar een overstroming van de waterkering en eventueel een dijkdoorbraak plaatsvindt. Aan elk van deze locaties werd een retentiebekken toegewezen waarvan het volume op basis van de berekeningen in Delft_FLS werd bepaald. Voor gebieden achter de dijken die in de overstromingssituatie sterk worden doorstroomd, werd deze doorstroming in SOBEK met behulp van een extra zijwaartse wateronttrekking respectievelijk een zijwaartse terugvoer van het water gesimuleerd. Enkele gebieden, die voor de waterstandreducerende maatregelen worden gebruikt, bleven hiervan uitgezonderd. Figuur 3-3 geeft een overzicht van de gebiedsindeling en van de punten waar een overstroming van de waterkeringen respectievelijk een dijkdoorbraak plaatsvindt. Meer details ter illustratie van de overstromingen in het 1D-model zijn te vinden in Bijlage 3-1 alsmede ook in Van der Veen et al. (2004a).

3.4 1D-modellering van de afvoer in het studiegebied rekening houdend met overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen

Een van de kernvragen in dit onderzoek is de vraag naar het effect van hoogwaterreducerende maatregelen. Omdat er een groot aantal varianten moest worden doorgerekend, werden de berekeningen uitgevoerd met het Decision Support System (DSS) Large Rivers. Dit DSS is gebaseerd op de rekenkern van het 1D-model SOBEK. Kenmerkend voor het DSS is een andere user-interface die de visualisering en een beter beheer van berekeningsscenario's en resultaten mogelijk maakt.

Het model omvat de hoofdrivier en de uiterwaarden van de Rijn tot aan de dijken en bestrijkt de Rijn vanaf Andernach tot Lobith en de Nederlandse Rijntakken tot aan de monding van de IJssel in het IJsselmeer, Krimpen aan de Lek aan de Lek en Werkendam aan de Waal / Boven - Merwede. De berekeningen worden uitgevoerd op basis van dwarsprofielen die voor het traject Andernach-Lobith op een afstand van 1000 m en voor de Rijntakken op een afstand van 500 m van elkaar liggen. Het model houdt rekening met de zijrivieren Ahr, Sieg, Wupper, Erft, Ruhr, Emscher, Lippe, Oude IJssel, Twentekanaal en diverse kleinere zijrivieren, alsook met de uitwisseling tussen rivier- en grondwater.

Tabel 3-5 geeft een overzicht van de berekende scenario's.

Alle scenario's komen een keer voor als scenario *zonder* en een keer *met* overstromingen langs de Niederrhein. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat een dijk pas breekt wanneer hij overstroomt. Alle andere typen waterkering blijven staan. Dit wordt zichtbaar aan de „_M“ (mit) resp de „_O“ (ohne) die aan de scenarionaam is toegevoegd.

In het project wordt gewerkt met drie referentiejaar: *Referentiejaar 1995* (als referentiesituatie Actieplan Hoogwater van de ICBR), *Referentiejaar 2002* (representeert de toestand in 2002) en *Referentiejaar 2020* (representeert de toestand in 2020).

Aan het *referentiejaar 1995* zijn alleen de scenario's 1995_M en 1995_O toegekend. In dit scenario zijn zowel in NRW als in Nederland geen waterstandreducerende maatregelen gerealiseerd. De toestand tussen de dijken komt overeen met het jaar 1995. Voor de dijkhoogten wordt echter uitgegaan van de hoogten in 2002. Dit scenario kan als referentiescenario worden

gebruikt als men bijvoorbeeld in het kader van het Actieplan Hoogwater van de ICBR wil beoordelen of er sinds 1995 veranderingen hebben plaatsgevonden. Veranderingen in de dijkhoogte die tussen 1995 en 2002 zijn gerealiseerd, werden daarbij echter verwaarloosd.

Aan het *referentiejaar 2002*, dat de toestand in 2002 weergeeft, worden de scenario's 2002_NRW_M en 2002_NRW_O toegewezen. Hier zijn alle waterstandreducerende maatregelen in NRW evenals de dijkhoogten weergegeven die tot nu toe (2002) zijn gerealiseerd. Omdat er in Nederland tot op heden nog geen waterstandreducerende maatregelen zijn uitgevoerd, zijn er in deze scenario's voor Nederland geen maatregelen opgenomen. Als men het effect van de maatregelen in NRW wil onderzoeken, kunnen de scenario's 1995_M respectievelijk 1995_O hierbij als referentiescenario's fungeren, omdat hier al wordt uitgegaan van de dijkhoogtes in de toestand van 2002.

Het *referentiejaar 2020* moet een mogelijke toestand in het jaar 2020 weergeven. Omdat het hier echter een moment in de toekomst betreft, werd met meerdere scenario's gewerkt:

- de scenario's 2020_NRW_NL_M respectievelijk scenario 2020_NRW_NL_O met de maatregelen zoals deze op dat moment in NRW en NL zijn gepland, en
- de scenario's 2020_NRWMAX_NL_M respectievelijk 2020_NRWMAX_NL_O, waarbij in NRW enkele maatregelen qua effect ten aanzien van de waterstanden zodanig worden veranderd dat deze effectiever zijn in het bereik van de maatgevende waterstanden.

In alle genoemde scenario's wordt integraal rekening gehouden met het waterstandreducerende effect van de Nederlandse maatregelen die in het kader van de PKB Ruimte voor de Rivier zijn gepland. Voor de dijkhoogte wordt uitgegaan van de hoogte die voor 2020 is gepland.

Om ook uitspraken te kunnen doen over het effect van de hoogwaterreducerende maatregelen werden bovendien nog de scenario's 2020_M respectievelijk 2020_O (steeds met en zonder dijkoverstromingen / dijkdoorbraak) berekend. Voor de bepaling van de veranderingen sinds 1995 zou ook hier het scenario 1995_M respectievelijk 1995_O moeten worden betrokken.

Om te onderzoeken welke effecten worden bereikt als slechts een deel van de waterstandreducerende maatregelen wordt uitgevoerd (alleen maatregelen in Nederland, alleen maatregelen in Duitsland) werden de scenario's 2020_NRW_M respectievelijk 2020_NRW_O, 2020_NL_M respectievelijk 2020_NL_O, evenals 2020_NRWMAX_M respectievelijk 2020_NRWMAX_O berekend.

De PLUS-scenario's geven inzicht in het effect van extra retentiepolders in het aan de Nederlandse kant gelegen grensgebied.

Alle berekeningen met de PLUS-scenario's evenals de berekeningen met de deelmaatregelen hebben een zuiver analytisch karakter en worden hieronder ook als zodanig beschouwd.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met de negen uitgekozen hoogwatersituaties voor Andernach en de zijrivieren van de Niederrhein (zie ook hoofdstuk 3.2), die met behulp van de neerslaggenerator zijn gegenereerd en waarbij is uitgegaan van dijkoverstromingen langs de Oberrhein.

Tabel 3-5 geeft een overzicht van de scenario's die met het DSS zijn berekend.

Tabel 3-5: Scenario's voor de berekeningen in DSS (respectievelijk in 1D-SOBK).

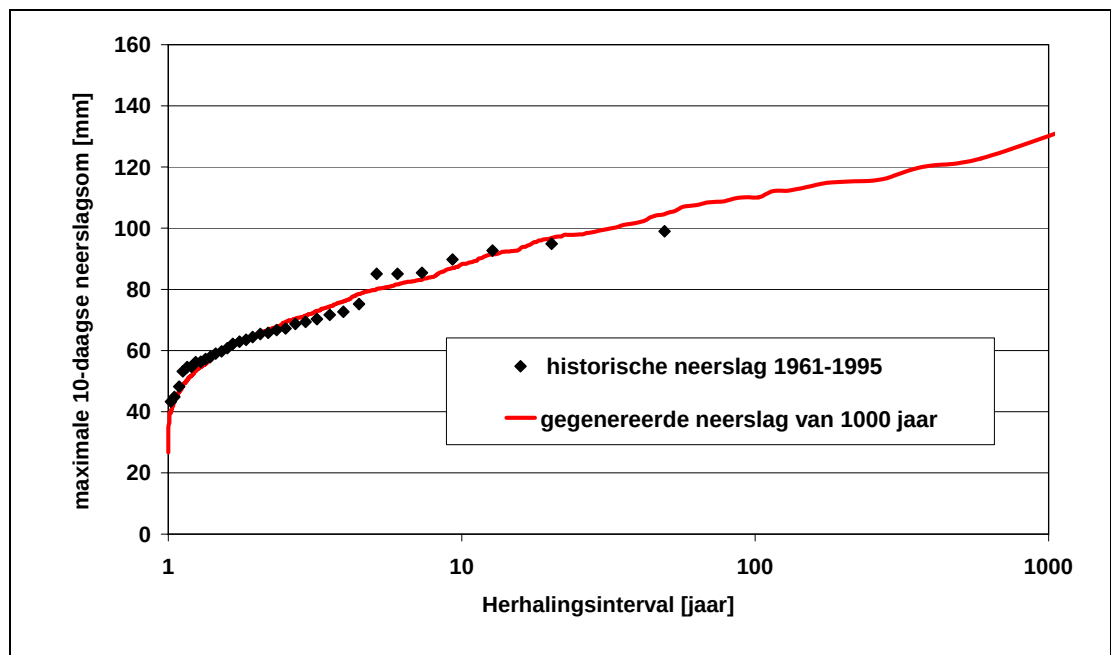
			1995_O	1995_M	1995_PLUS_O	1995_PLUS_M	2002_NRW_O	2002_NRW_M	2002_NRW_PLUS_O	2002_NRW_PLUS_M	2020_O	2020_M	2020_NRW_NL_O	2020_NRW_NL_M	2020_NRW_O	2020_NRW_M	2020_NL_O	2020_NL_M	2020_NRW_NL_PLUS_O	2020_NRW_NL_PLUS_M	2020_NRW_NL_PLUS_O	2020_NRW_NL_PLUS_M	2020_NRWMAX_NL_O	2020_NRWMAX_NL_M	2020_NRWMAX_O	2020_NRWMAX_M
Dijkhoogtes (indien dijkoverstromen)			2002									2020														
Systeemtoestand Oberrhein			OR-2002mit									OR-2020mit														
Waterstandreducerende maatregel in NRW																										
Naam	Plannings-variant	Type																								
Köln-Langel	BPV ¹⁾	RP OD					X	X	X	X			X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾
Worringer Bruch	PV-V3 ¹⁾	RP st											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾
Monheim	UV	DTL LD					X	X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Itter-Himmelgeist	PV-2A	DTL											X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Ilvericher Bruch	PV-B2	RP st											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾
Mündelheim	PV-V4	DTL											X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Orsoy Land	UV	DTL LD					X	X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Bislicher Insel	UV	RP O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lohrwardt	BPV ¹⁾	RP OD					X	X	X	X			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Griether Busch	PV	RP O											X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Bylerward	PV-B3	RP st											X	X	X	X			X	X	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾
Orsoyer Bogen ⁴⁾	--	RP st																			X	X	X	X	X	
Brücke bei Wesel ³⁾	--	K																				X	X	X	X	
Bislicher Insel 2020 ³⁾	--	K																				X	X	X	X	
Reeser Schanz ³⁾	--	HWG																				X	X	X	X	
Waterstandreducerende maatregel in NL																										
Werking maatregelen PKB Ruimte voor de rivieren													X	X				X	X	X	X	X	X	X		
Aanvullende waterstandreducerende maatregelen in NL																										
Ooijpolder					X	X			X	X									X	X						
Rijnstrangen					X	X			X	X									X	X						
PV: Planningsvariant			DTL: Dijkteruglegging										UWV: Uiterwaardverlaging													
BPV: Bestemmingsplanvariant			DTL LD: Dijkteruglegging met leidam										RP st: Retentiepolder met stuurbare overlaat													
UV: Uitvoeringsvariant			K: Verwijdering hydraulische knelpunten										RP O: Retentiepolder met vaste overlaat (ongestuurd)													
			HWG: Hoogwatergeul										RP OD: RP O, echter bij hoge afvoeren doorstroomd													
1) hierbij is rekening gehouden met de nieuwste gegevens van STUA Köln.																										
2) In- en uitlaatconstructie in het model zijn zodanig veranderd dat de maatregel op de maatgevende afvoer is afgestemd.																										
3) extra geplande maatregel voor het verwijderen van hydraulische knelpunten.																										
4) extra retentiepolder die tot nu toe niet in de planning is opgenomen.																										

Meer details zijn te vinden bij Mehlig (2004) en Van der Veen et al. (2004a en 2004b).

4 Extreme afvoeren uit het stroomgebied van de Rijn

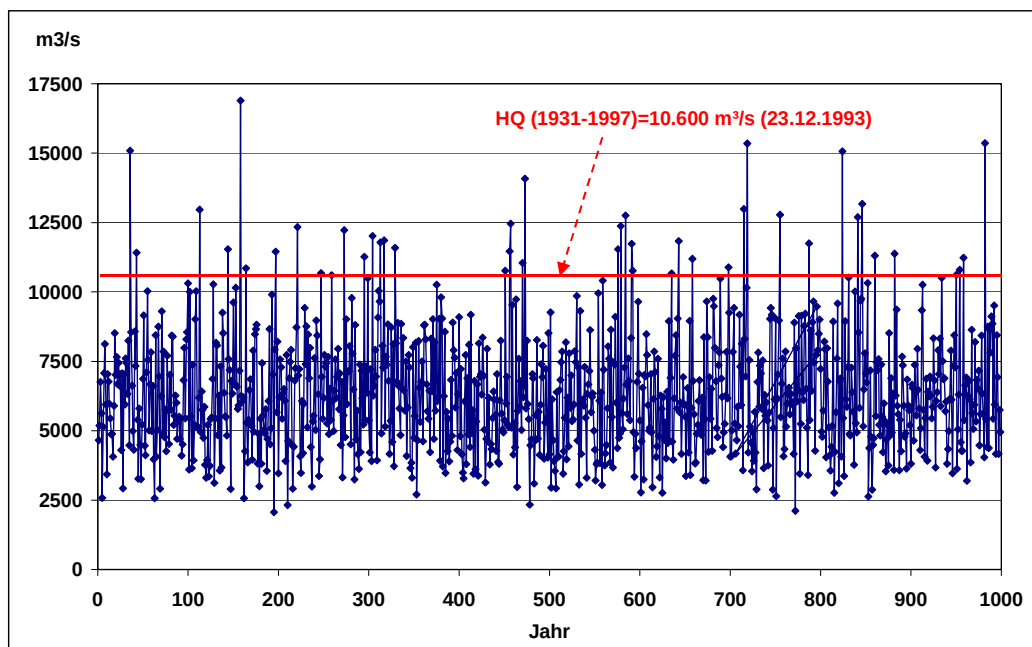
4.1 Extreme neerslagen leiden tot extreme afvoeren

Met behulp van een stochastische neerslaggenerator werden extreme meteorologische situaties gegenereerd. Daarbij werd uitgegaan van het principe "*Nearest-Neighbour Resampling*": De historische dagen worden samen met de bijbehorende neerslag- en temperatuurwaarden in een nieuwe tijdreeks bij elkaar gezet, waarbij een dag echter alleen door die dagen kan worden gevolgd die in de historische reeks op een vergelijkbare dag zijn gevolgd. Een historische dag kan hierbij meerdere keren voorkomen, zodat een reeks met een willekeurige lengte kan worden gemaakt. De invoerdata voor de Rijn-neerslaggenerator zijn de dagwaarden van de temperatuur en de neerslag gedurende de periode 1961-1995 van 36 over het gehele Rijnstroomgebied verdeelde stations. Het resultaat is een realistische reeks van historische dagen/gegevens. Omdat er voor deze dagen nog meer informatie beschikbaar is (bijvoorbeeld de neerslaghoeveelheden van de gebieden en de gegevens van andere stations) kan men ook deze waarden in dezelfde volgorde brengen. Zoals Figuur 4-1 laat zien komen de statistische eigenschappen van de gesimuleerde tijdreeksen zeer goed met die van de historische tijdreeksen overeen. Als gevolg van de gehanteerde methode kunnen geen hogere neerslaghoeveelheden voor een bepaalde dag worden gesimuleerd dan in de historische reeks zijn voorgekomen. Wel komen in de simulatie voor 1000 jaar hogere 10-daagse neerslagsommen voor.



Figuur 4-1: Frequentieverdeling voor de maximale 10-daagse sommen van de winterneerslagen voor gemeten en gegenereerde neerslagen (gemiddelde waarde van de neerslagen bij 34 meetstations in het Rijngebied). Bron: Eberle et al. (2004).

Uitgaande van de door de neerslaggenerator gegenereerde meteorologische grootheden werd de afvoer gedurende 1000 jaar berekend voor de zijrivieren van de Rijn en de belangrijke meetstations langs de Rijn. Figuur 4-2 illustreert de berekende jaarmaxima voor het meetstation bij Andernach. Ter vergelijking is de hoogste afvoer in de tijdreeks 1931 tot 1997 weergegeven. Deze deed zich voor op 23 december 1993.



Figuur 4-2: Jaarmaximum van duizend jaar gesimuleerde afvoer bij het meetstation Andernach aan de Rijn.

4.2 Het effect van dijkoverstromingen en retentiemaatregelen op de Oberrhein

Op basis van deze gegevens werden de 16 afvoergolven uitgekozen die bij Andernach de hoogste topafvoeren te zien gaven. Voor deze afvoergolven werden de berekeningen nog een keer uitgevoerd met de waterbewegingsmodellen SYNHP en SOBEK. De afvoergolven, die met het neerslag-afvoermodel voor de zijrivieren en voor de Rijn bij Basel waren berekend, dienden daarbij als invoer. Hierbij werden voor de drie in Tabel 3-1 weergegeven systeemtoestanden (toestand 2002 zonder dijkoverstromingen, toestand 2002 met dijkoverstromingen, en 2020 met dijkoverstromingen) berekeningen uitgevoerd. De berekende topafvoeren zijn weergegeven in Tabel 4-1. De resultaten laten zien dat zonder dijkoverstromingen langs de Oberrhein en de Niederrhein een afvoer van 17800 m³/s bij Andernach respectievelijk van 19200 m³/s bij Lobith mogelijk lijkt (HW158). Dit betekent dat er in het stroomgebied van de Rijn in principe meteorologisch-hydrologische situaties denkbaar zijn die tot de genoemde extreme afvoeren kunnen leiden.

Tabel 4-1: Topafvoeren van de 16 gegenereerde hoogste hoogwaters. Alle berekeningen zijn zonder dijkoverstroming op de Niederrhein.

Model-hoogwater	Topafvoeren hydrologisch/hydraulische modellering BfG ¹⁾ [m³/s]					
	Toestand OR-2002 ohne		Toestand OR-2002 mit		Toestand OR-2020 mit	
	Andernach	Lobith	Andernach	Lobith	Andernach	Lobith
HW036	15956	17703	14406	15998	14416	16057
HW113	14430	15283	12409	13620	12402	13607
HW158	17822	19200	15323	16706	15361	16766
HW221	13123	14358	12003	13338	12007	13343
HW329	12362	14177	12230	14083	12226	14072
HW457	14157	15033	11442	12725	11450	12727
HW473	15201	15640	12614	13346	12479	13055
HW579	13627	15258	12085	13990	12083	13985
HW584	13046	13876	12067	13057	12071	13061
HW715	14749	15715	12086	13537	12077	13537
HW719	16135	16754	13883	14658	13888	14664
HW755	13116	14235	12435	13739	12436	13738
HW824	15757	17266	15121	16627	15121	16624
HW841	13677	14906	12412	13886	12410	13884
HW846	14176	15433	12413	14131	12414	14138
HW982	16022	17175	14049	14965	14036	14952
¹⁾ Voor Lobith kunnen de door de BfG berekende resultaten afwijken van de resultaten die later met de andere modellen (Delft-FLS, SOBEK/DSS) werden gemaakt (vergelijk hoofdstuk 11)						

Houdt men rekening met mogelijke dijkoverstromingen en gecontroleerde retentiemaatregelen op de Oberrhein, maar zonder overstromingen op de Niederrhein dan komt het niveau van de topafvoeren m.b.t. de huidige toestand 2002 duidelijk lager te liggen op ongeveer 15300 m³/s bij Andernach en 16700 m³/s bij Lobith. Uitgedrukt in percentages schommelt de vermindering van de topafvoeren afhankelijk van de hoogwatergenese en de hoogwaterhoogte tussen 1 en 19% (Tabel 4-2). Dit kan vooral worden verklaard door het overstromen van de dijken. Het effect van de retentiemaatregelen op de Oberrhein is echter gering. Deze worden ingezet voordat het tot een overstroming van de dijken komt en zijn meestal al gevuld als de afvoertop de retentiemaatregel passeert, respectievelijk als het tot een overstromen van de dijken komt. Bovendien is het door de overstromingen gebruikte volume duidelijk groter dan dat van de retentiegebieden.

Tabel 4-2: Effect van dijkoverstromingen en retentiemaatregelen op de Oberrhein op de topafvoeren van de extreme hoogwaters bij Andernach en Lobith. Alle berekeningen zijn gemaakt zonder dijkoverstroming op de Niederrhein.

Model- hoogwater	Effect dijkoverstroming op de Oberrhein ¹⁾ (toestand OR-2002 mit - toestand OR-2002 ohne)				Effect maatregelen 2002 – 2020 ¹⁾ (toestand OR-2002 mit - toestand OR-2020 mit)			
	Andernach [m ³ /s]	Andernach [%]	Lobith [m ³ /s]	Lobith [%]	Andernach [m ³ /s]	Andernach [%]	Lobith [m ³ /s]	Lobith [%]
HW036	-1550	-10	-1705	-10	-10	-0,1	-59	-0,4
HW113	-2022	-14	-1663	-11	7	0,1	13	0,1
HW158	-2498	-14	-2494	-13	-37	-0,2	-60	-0,4
HW221	-1120	-9	-1020	-7	-3	0,0	-6	0,0
HW329	-132	-1	-94	-1	4	0,0	11	0,1
HW457	-2715	-19	-2309	-15	-9	-0,1	-2	0,0
HW473	-2588	-17	-2294	-15	135	1,1	291	2,2
HW579	-1542	-11	-1268	-8	3	0,0	5	0,0
HW584	-979	-8	-820	-6	-4	0,0	-5	0,0
HW715	-2663	-18	-2178	-14	9	0,1	0	0,0
HW719	-2252	-14	-2096	-13	-5	0,0	-6	0,0
HW755	-680	-5	-497	-3	-1	0,0	0	0,0
HW824	-636	-4	-638	-4	0	0,0	4	0,0
HW841	-1265	-9	-1020	-7	2	0,0	2	0,0
HW846	-1763	-12	-1302	-8	0	0,0	-7	0,0
HW982	-1973	-12	-2210	-13	13	0,1	13	0,1

¹⁾ Voor Lobith kunnen de hier weergegeven en door de BfG berekende resultaten afwijken van de resultaten die later met de andere modellen (Delft-FLS, SOBEK/DSS) werden gemaakt (zie ook hoofdstuk 11).

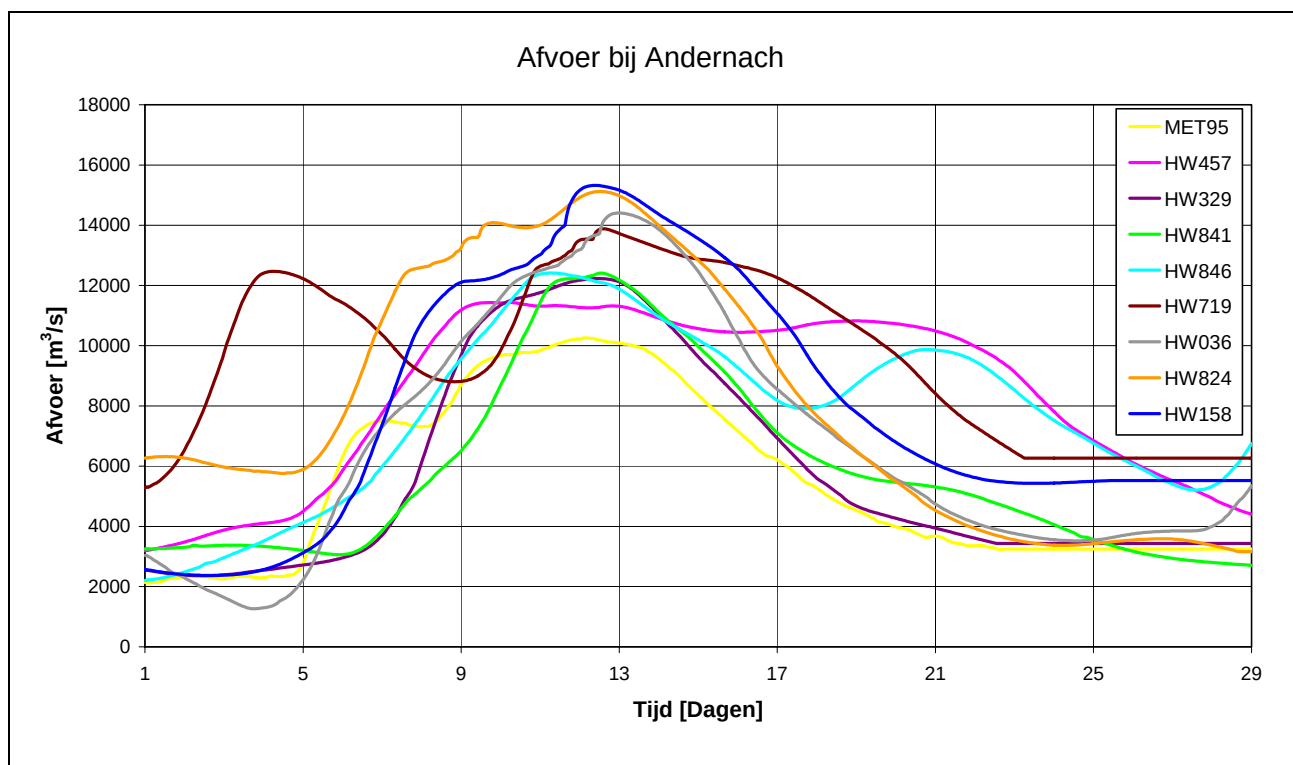
4.3 Selecteren van geschikte afvoergolven

Op basis van de in hoofdstuk 3.2 uitgelegde criteria werden acht afvoergolven uitgekozen. Gerangschikt naar de grootte van de topafvoer worden deze in Tabel 4-3 weergegeven. Meer informatie m.b.t. de selectie van de afvoergolven is te vinden in Van der Veen et al. (2004a). Naast de genoemde criteria (hoofdstuk 3.2) dekken de afvoergolven ook een breed scala van golfvormen en hoogwatergenese af (Figuur 4-4). Meer gedetailleerde informatie is te vinden in Eberle et al. (2004).

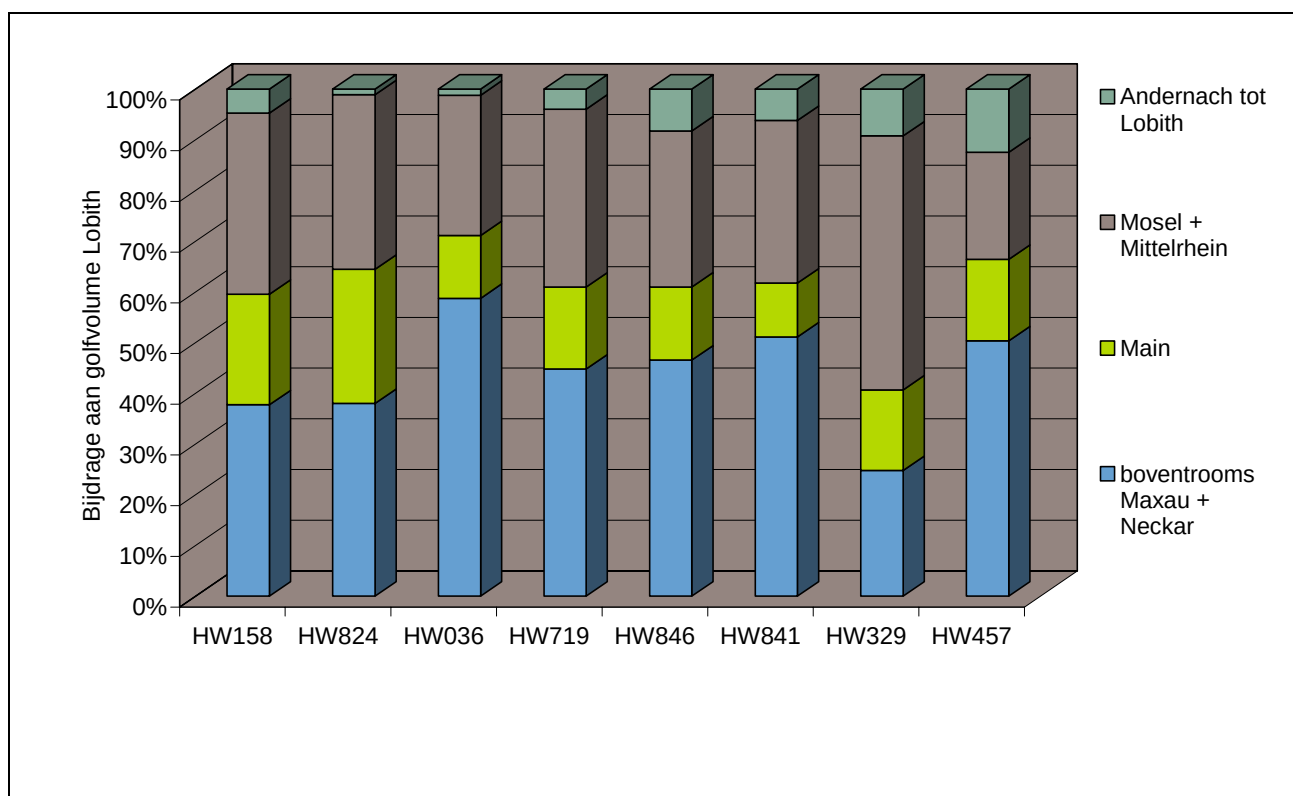
Tabel 4-3: Uitgekozen afvoergolven (bron: Van der Veen et al., 2004a). Het hoogwater MET95 is het historische hoogwater van januari 1995.

Model- hoogwater	OR-2002 mit (dijkoverstroming op de Oberrhein, geen dijkoverstroming op de Niederrhein)			Criterium
	Andernach [m ³ /s]	Lobith ¹⁾ [m ³ /s]	Lobith ²⁾ [m ³ /s]	
MET95	10257	11960	11958	5
HW457	11442	12725	12628	4
HW329	12230	13886	13862	3
HW841	12412	14083	13500	3
HW846	12413	14131	13760	3
HW719	13883	14658	14867	2
HW036	14406	15998	15685	2
HW824	15121	16627	16708	1
HW158	15323	16706	16283	5

1) Resultaten van de berekeningen van de BfG tot Lobith
2) Resultaten van de berekeningen met SOBEK/DSS



Figuur 4-3: Golfvormen van de uitgekozen afvoergolven bij Andernach (systeemtoestand OR-2002 mit).

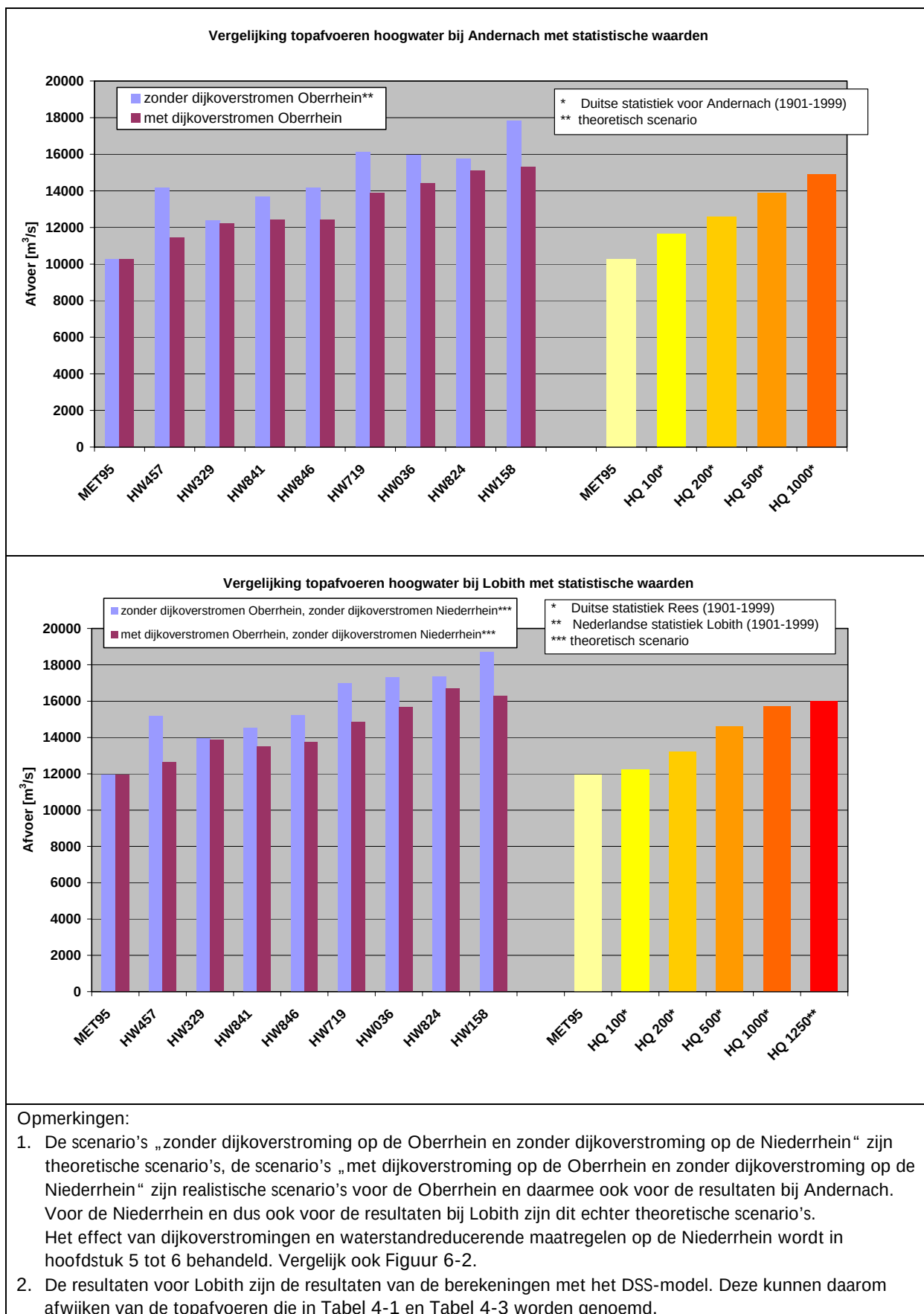


Figuur 4-4: Genese van de uitgekozen extreme situaties (volgens Eberle et al., 2004).

4.4 Hoe extreem zijn de extreme hoogwaters?

Om uitsluitel te krijgen over de vraag hoe hoog de berekende hoogwatertoppen zijn in vergelijking tot de cijfers die tot nu toe werden gehanteerd, zijn de berekende topafvoeren vergeleken met de herhalingsfrequenties van 100 jaar, 200 jaar, 500 jaar en 1000 respectievelijk 1250 jaar. Figuur 4-5 illustreert de resultaten, zowel voor de scenario's mét als zónder dijkoverstromingen op de Oberrhein (echter steeds zonder dijkoverstroming / dijkdoorbraak op de Niederrhein). Bij de scenario's „zonder dijkoverstroming op de Oberrhein en zonder dijkoverstroming op de Niederrhein” gaat het om theoretische scenario's. De scenario's „met dijkoverstromingen op de Oberrhein en zonder dijkoverstromingen op de Niederrhein” geven echter realistische scenario's voor de Oberrhein (en dus de resultaten bij Andernach) maar zijn theoretisch scenario's voor de Niederrhein (en dus voor de resultaten bij Lobith). Deze scenario's worden er echter bij betrokken om een indruk te krijgen welke effecten alleen de overstromingen op de Oberrhein hebben.

Over het geheel genomen wordt er een dilemma zichtbaar als deze topafvoeren aan een herhalingsfrequentie worden gekoppeld. Geldt de herhalingsfrequentie voor het scenario zonder dijkoverstroming, d.w.z. heeft deze betrekking op de terugkeertijd van de situaties als men dit vanuit een zuiver hydrologisch perspectief (dus zonder dijkoverstroming) beschouwt? Of moet de herhalingsfrequentie aan de topafvoer voor het scenario met dijkoverstroming worden gerelateerd? Hier is de vraag aan de orde welke situaties door de hoogwaterstatistiek eigenlijk worden weergegeven. Hoogwaterstatistieken zijn gebaseerd op de gemeten waterstanden/afvoeren van de laatste 50 tot 100 jaar, waarbij doorgaans geen overstromingen van de dijken hebben plaatsgevonden. Voor het bepalen van afvoeren met een herhalingsfrequentie van 1/200, 1/500, 1/1000 of nog minder moet naar een extreem bereik worden geëxtrapoleerd, waarbij niet meer bekend is wat er in het stroomgebied hydrologisch en hydraulisch werkelijk gebeurt. In ieder geval moet ervan worden uitgegaan (en dit wordt door de voorliggende studie bevestigd) dat er bij dit soort afvoeren fenomenen als dijkoverstromingen plaatsvinden en dat deze de topwaarden van de afvoer sterk beïnvloeden.



Figuur 4-5: Vergelijking van hoogwatertoppen met statistische waarden.

5 Overstromingen op de Niederrhein en in Gelderland

5.1 Overstromingsscenario's

De belangrijkste uitspraken ten aanzien van overstromingen op de Niederrhein en in Gelderland kunnen worden gedaan op basis van de overstromingsberekeningen die met het 2D-overstromingsmodel Delft-FLS zijn gemaakt (zie ook hoofdstuk 3.3). Daarbij is in principe van twee systeemtoestanden uitgegaan (zie Tabel 3-3):

- toestand 1995, met de riviergeometrie van het jaar 1995 (d.w.z. zonder waterstandreducerende maatregelen op de Niederrhein) en de dijkhoogte van 2002, en
- toestand 2020, met de riviergeometrie van het jaar 1995 (d.w.z. zonder waterstandreducerende maatregelen op de Niederrhein) en de dijkhoogte van 2020.

Kortom: alle berekeningen met Delft-FLS zijn zonder waterstandreducerende maatregelen uitgevoerd en corresponderen met de scenario's 1995_M respectievelijk 2020_M van de 1D-berekeningen.

Tabel 3-4 geeft een overzicht van alle berekeningen die met Delft-FLS zijn uitgevoerd. Hierbij kunnen de berekeningen voor de scenario's 1995_DB en 2020_DB met de twee hoogste hoogwatersituaties HW158 en HW824, elk met overstromingen op de Oberrhein (HW158mitDueb en HW824mitDueb) als realistische scenario's worden geclassificeerd (Tabel 3-4). In dit hoofdstuk (hoofdstuk 5) zal alleen op deze scenario's uitvoerig worden ingegaan.

Met behulp van de 1D-berekening kan inzicht worden verkregen in de vraag welke gebieden bij dezelfde scenario's, maar bij de andere hoogwatersituaties, door overstromingen worden getroffen. Dit aspect zal eveneens in dit hoofdstuk (hoofdstuk 5) worden behandeld.

Uit de 1D-berekeningen kan ook worden afgeleid welke gebieden bij de scenario's met retentiemaatregelen zijn betrokken. Ook dit zal in hoofdstuk 5 nader worden toegelicht.

Pas in een later stadium (hoofdstuk 9.3) zal de vraag worden besproken wat er gebeurt als er nog meer water uit het stroomgebied van de Rijn wordt aangevoerd, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatveranderingen of veranderingen in het stroomgebied.

De vraag in hoeverre de resultaten beïnvloed worden door het uitgangspunt dat dijken zullen breken als deze overstroom, zal in hoofdstuk 11.8 worden onderzocht.

Gudden (2004) geeft een uitvoerige uiteenzetting van het onderzoek met betrekking tot de overstromingen bij extreme hoogwatersituaties op de Niederrhein en in Gelderland.

5.2 Door overstromingen getroffen Gebieden langs de Niederrhein

5.2.1 Resultaten van de 2D-berekeningen

De belangrijkste uitspraken ten aanzien van overstromingen op de Niederrhein en in Gelderland kunnen worden gedaan op basis van de overstromingsberekeningen die met het 2D-overstromingsmodel Delft-FLS zijn gemaakt. In deze paragraaf zal dit exemplarisch voor het hoogwater HW824 mit Dueb gebeuren, waarbij de hoogste afvoeren (rekening houdend met de overstromingen op de Niederrhein) bij Lobith ontstaan. De resultaten van zowel de huidige toestand (scenario 1995_DB) als van de toekomstige toestand (scenario 2020_DB) zullen hier worden toegelicht. Meer details zijn te vinden in Gudden (2004) en zijn te zien op de overstromingsfilms die op basis van de berekeningen werden gemaakt.

Ter verduidelijking van de tekst geeft Figuur 3-3 een ruimtelijke oriëntatie. In de onderstaande tekst zal steeds van hoogwatersituaties worden uitgegaan waarbij met overstromingen op de Oberrhein rekening wordt gehouden.

➤ Situatiebeschrijving aan de hand van het voorbeeld HW824 (mit Dueb)

- **Huidige situatie (scenario 1995_DB)**

Welke gebieden bij realistische uitgangspunten (overstromingen op de Oberrhein, dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstromingen op de Niederrhein) in de *huidige situatie* (scenario 1995_DB) door overstromingen worden getroffen, illustreert Bijlage 4-1 (bovenste figuur) voor het hoogwater HW824. Het wordt duidelijk dat vooral de zuidelijk gelegen gebieden op de rechteroever tot Düsseldorf en op de linkeroever tot ongeveer Kamp-Lintfort worden getroffen. Deze overstromingen worden vooral veroorzaakt door het overstromen van gedeelten met hoge oevers en van keermuren. Slechts in vier gevallen (het gebied D_019 op de rechter Rijnsoever bij de monding van de Wupper, het gebied gebied D_023 bij Himmelgeist-Itter bovenstrooms van Düsseldorf, het gebied D_026 op de linker Rijnsoever bij Neuß-Gnadental en tot slot het gebied D_027 in Heerd-Oberkassel tegenover Düsseldorf) worden dijken getroffen waarvoor in dit scenario een dijkbreuk als gevolg van een dijkoverstroming is verondersteld.

Daarnaast overstroomt in Emmerich de keermuur, zodat het water over de Duits-Nederlandse grens in de richting van de Oude IJssel en de IJssel stroomt (gebied O_041).

- **Toekomstige situatie (scenario 2020_DB)**

Een blik op Bijlage 4-1 (onderste figuur) maakt duidelijk dat er ook na de dijkversterkingen in NRW geen belangrijke veranderingen ten aanzien van de overstromings situatie zullen ontstaan. Alleen bij Emmerich zal de keermuur net niet meer overstromen, zodat er geen grensoverschrijdende overstromingen meer zullen ontstaan.

- *Veranderingen als gevolg van dijkversterkingen*

Ook Bijlage 4-2 geeft een gedetailleerd beeld van de veranderingen die zullen optreden als gevolg van de dijkversterkingen. Als gevolg van het feit dat er in het Duits-Nederlandse grensgebied geen overstromingen meer plaatsvinden, zal er in dit gebied een verschil ontstaan ten aanzien van de waterstand tot 3 meter. Naast deze locatie treden de grootste verschillen in de waterstand op de linker Rijnsoever in het gebied tussen Köln en Dormagen, bij Dormagen en bij

Krefeld optreden, en op de rechter Rijnsoever bij Düsseldorf. In deze gebieden kunnen overstromingen niet worden voorkomen, maar de maximale waterdiepten zijn in 2020 ongeveer 0,2 tot 1 m lager. In belangrijke mate wordt dit veroorzaakt door de verhoging van de waterkeringen (vergelijk Bijlage 1-3 en Bijlage 1-4). In enkele gevallen zal de waterstand echter stijgen. Getroffen worden vooral gebieden in het zuidelijkste gedeelte. Op de linker Rijnsoever bij Brühl (gebied O_006) en op de rechter Rijnsoever bij Köln Niederkassel-Langel (gebied O_008) zullen in 2020 hogere waterstanden ontstaan, omdat waterkeringen in de stroomafwaarts gelegen delen van deze gebieden worden verhoogd. Daardoor kan het water niet meer naar de Rijn terugstromen en wordt het water hoger opgestuwd. Bij Bergisch Gladbach (gebied O_013) en bij Leverkusen (gebied O_014) treden in 2020 achter de dijken hogere waterstanden op dan in de situatie van 1995_DB, omdat het gebied Köln/Riehl-Worringen (gebied O_016) aan de andere kant van de Rijn door verbeteringen van de waterkering later en minder zal overstromen. Daardoor ontstaat er in de Rijn een hogere waterstand die tot een grotere overstroming van de gebieden bij Leverkusen en Bergisch Gladbach (gebieden O_014 en O_013) zal leiden.

➤ **Situatiebeschrijving aan de hand van het voorbeeld HW158 (mitDueb)**

Een soortgelijke ontwikkeling geldt in principe voor HW158 (zie Bijlage 4-3 en Bijlage 4-4). HW158 heeft bij Andernach weliswaar een iets hogere top dan het hierboven genoemde HW824, maar door zijn kleinere volume zijn de afvoerreducerende effecten in het topbereik duidelijker dan bij het hoogwater HW824, zodat deze binnen dit project de op één na hoogste hoogwatersituatie vormt voor het benedenstroomse gedeelte van de Niederrhein.

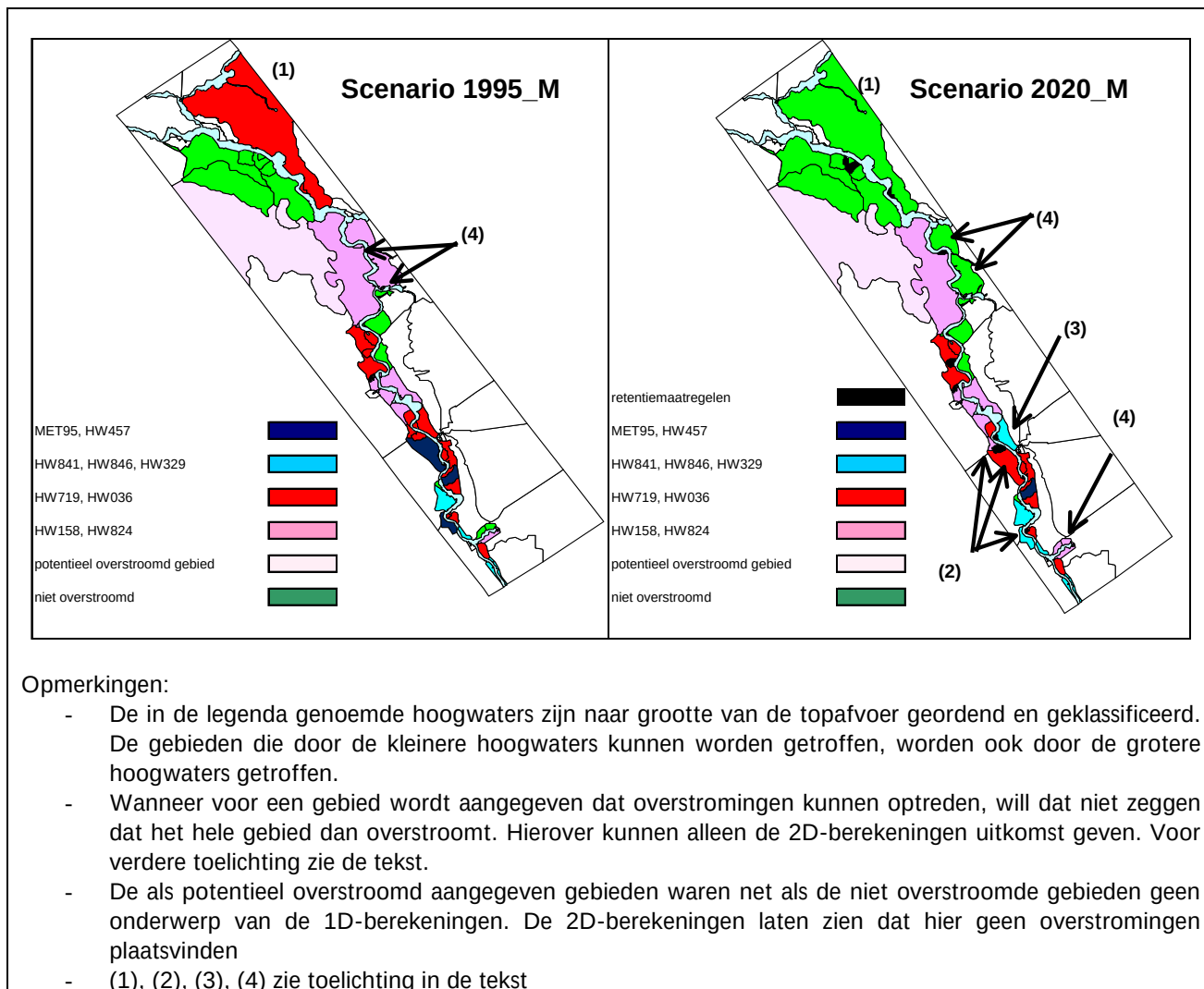
5.2.2 Resultaten van de 1D-berekeningen

De resultaten van de eendimensionale berekeningen waarbij *alle negen uitgekozen hoogwatersituaties* zijn onderzocht, laten zien welke overstromingsgebieden die voor de koppeling van de modellen Delft-FLS en SOBEK/DSS zijn aangewezen, ook bij de andere - in vergelijking tot de eerder genoemde HW824 en HW158 meestal lagere - hoogwatersituaties worden getroffen (Figuur 5-1). Hieruit blijkt dat in het *scenario 1995_M* (d.w.z. bij de huidige dijkhoogte maar zonder dat waterstandreducerende maatregelen worden meegerekend) bij de kleinere extreme hoogwaters in eerste instantie alleen de zuidelijke gebieden getroffen worden en bij toename van de hoogwaters ook de gebieden in het middengedeelte. Alleen bij Emmerich (in de met (1) gemarkeerde gebieden van Figuur 5-1) stroomt er al bij het hoogwater HW719 water over de keermuur in de daarachter gelegen, grensoverschrijdende polder.

Ten aanzien van gebieden die in Figuur 5-1 zijn gemarkeerd als „getroffen door overstromingen“ moet op deze plaats wel worden benadrukt dat niet het gehele binnendijkse gebied zonder meer zal onderstromen. Hierover kunnen uiteindelijk alleen de 2D-berekeningen uitsluitsel geven (zie Bijlage 4-1 en Bijlage 4-3)

Na voltooiing van de geplande dijkversterkingen in NRW (*scenario 2020_M*) zal het beeld weliswaar niet fundamenteel veranderen, maar zoals de 2D-berekeningen laten zien, zal de situatie plaatselijk gezien duidelijk verbeteren (o.a. ook door de al genoemde, lagere maximale waterstanden na overstromingen). In dit scenario worden nog steeds de zuidelijk gelegen gebieden getroffen. Dit geldt vooral voor diverse gebieden op de linkeroever in

de omgeving van Köln, die nu bij grotere hoogwaters door overstromingen worden getroffen dan in het scenario 1995_M (de met (2) gemarkeerde gebieden in Figuur 5-1). Hier wordt de waterkering over een lang traject verbeterd (zie Bijlage 1-3). Op ditzelfde traject zal dit er echter toe leiden dat een gebied op de rechter Rijnsoever eerder zal overstromen dan in scenario 1995_M (de met (3) gemarkeerde gebieden in Figuur 5-1). Duidelijk zijn ook de gevolgen van de verbeterde hoogwaterkering in Emmerich (het met (1) gemarkeerde gebied in Figuur 5-1). De gebieden die met een (4) zijn gemarkeerd, zijn gebieden waar slechts zeer kleine overstromingen zullen ontstaan.



Figuur 5-1: Gebieden langs de Nederrijn waar bij de genoemde hoogwaters overstromingen kunnen ontstaan. Resultaten DSS, scenario 1995_M en 2020_M.

De *aanleg van hoogwaterreducerende maatregelen* in NRW en Nederland heeft geen noemenswaardige effect op de vraag of de gebieden in de desbetreffende hoogwatersituaties overstromen of niet. Maar de situatie verbetert wel door de geringere maximale waterstanden in het overstroemde gebied na een dijkoverstroming. Slechts hier en daar kan worden bereikt dat een gebied pas bij een hogere waterstand zal overstromen. Daarom kan een nadere uiteenzetting hier achterwege blijven (Van der Veen et al., 2004b).

5.3 Dynamiek van de overstromingen

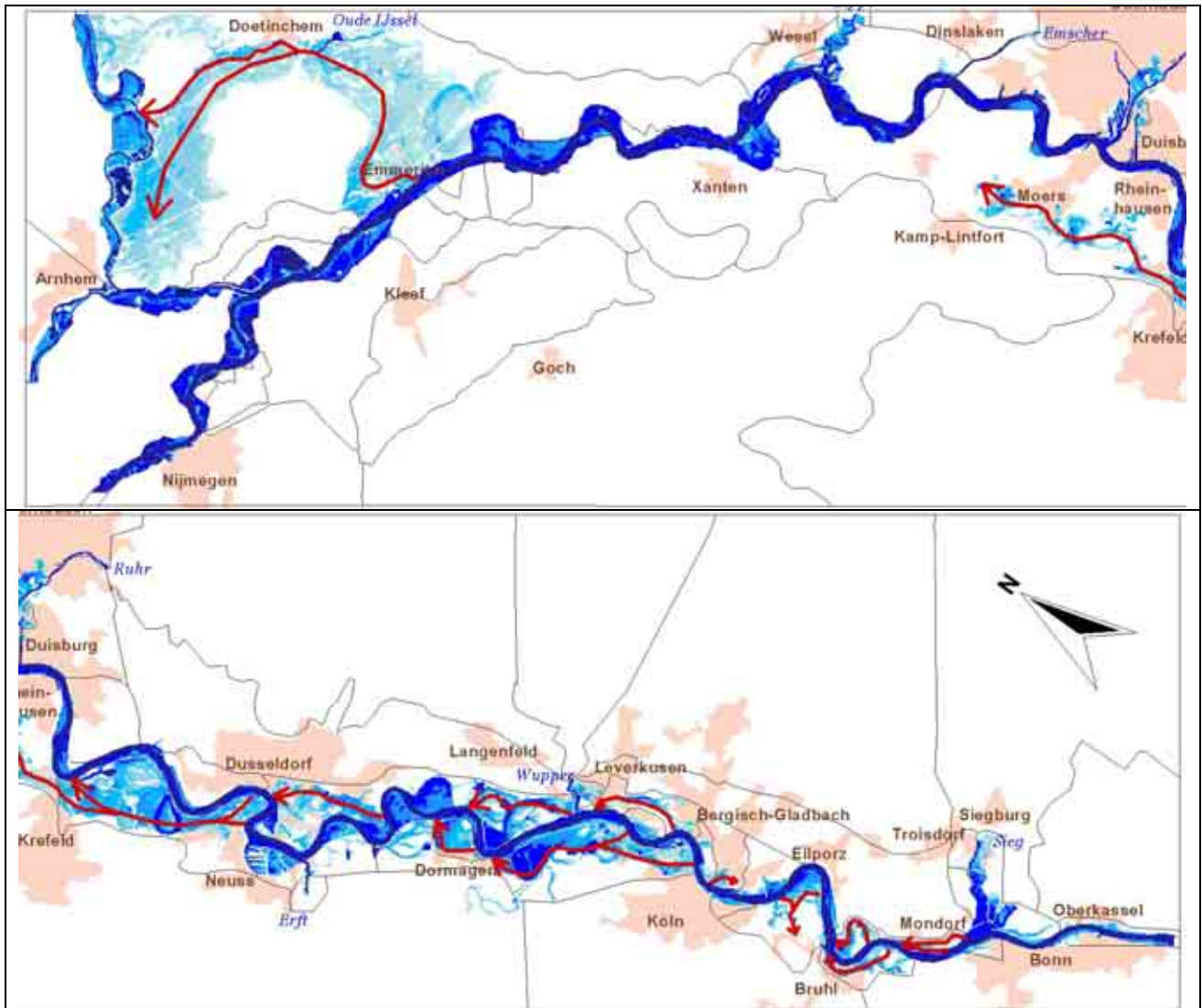
Bij overstromingen is zowel qua ruimte als qua tijd sprake van een dynamisch proces. De overstromingsfilms die door de Provincie Gelderland zijn gemaakt, brengen dit uitvoerig in beeld. Hieronder worden de fundamentele processen van deze dynamiek (achtereenvolgende gebeurtenissen in de door overstromingen getroffen gebieden en stroomwegen) uiteengezet.

De *overstromingsdynamiek qua tijd* kan al uit Figuur 5-1 worden afgeleid. Zo valt bijvoorbeeld te verwachten dat in een hoogwatersituatie allereerst de gebieden zullen overstromen die ook in minder extreme situaties zijn ondergelopen, d.w.z. het zuidelijke gedeelte van de Niederrhein en in de huidige toestand (1995) de grensoverschrijdende polder bij Emmerich, en pas daarna nog meer polders in het middengedeelte. Deze eerste inschatting wordt op indrukwekkende wijze in de overstromingsfilms aanschouwelijk gemaakt. Hierin worden de resultaten van de tweedimensionale berekeningen uit Delft-FLS qua opeenvolging in de tijd in beeld gebracht. Tabel 5-1 laat zien welke gebieden op welk moment beginnen onder te lopen.

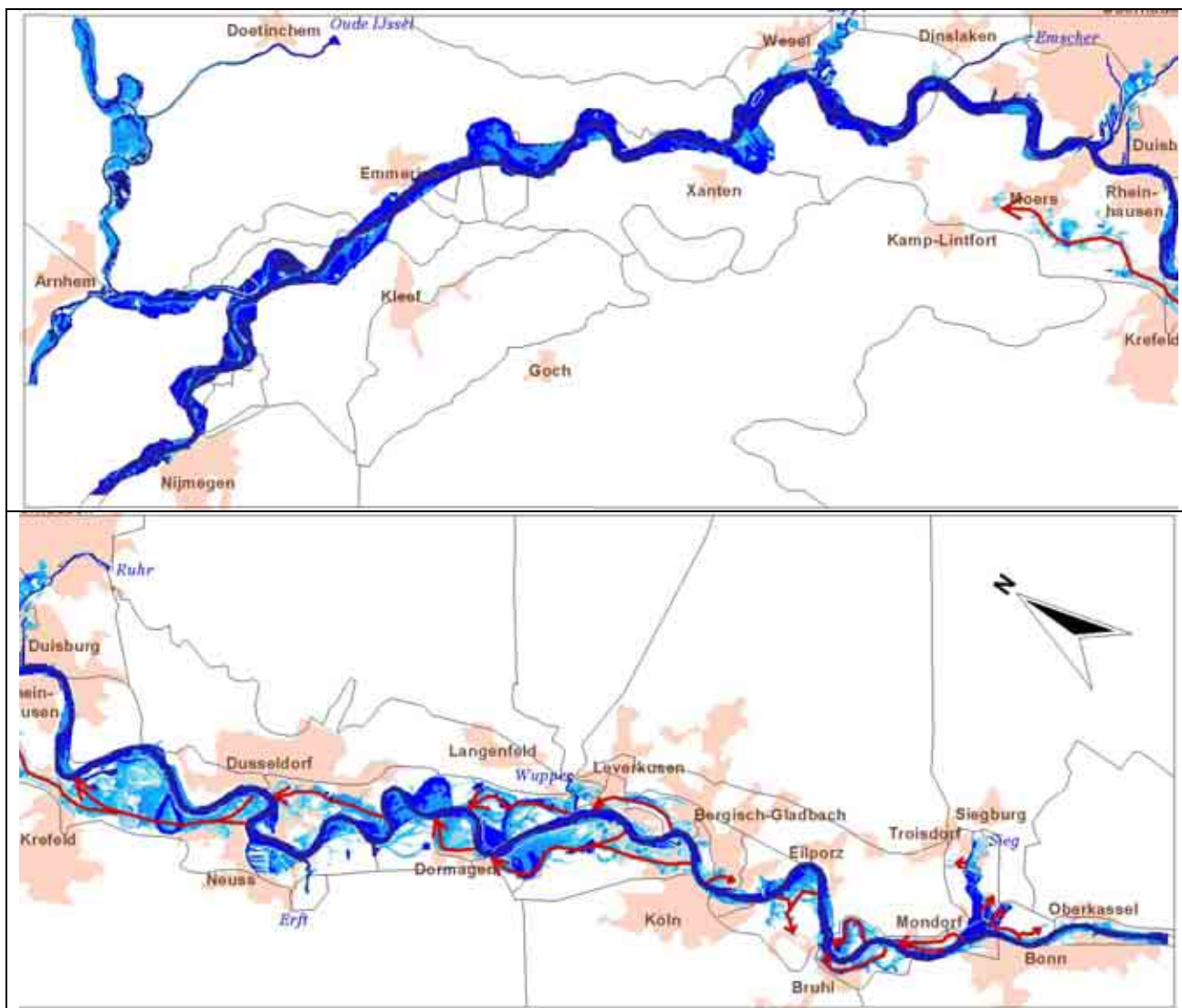
Tabel 5-1: Chronologie bij de overstroming van afzonderlijke gebieden. Hoogwatersituatie HW824, scenario 1995_DB en scenario 2020_DB (volgens Gudden, 2004).

Scenario 1995 DB		Scenario 2020 DB	
Gebied	Begin van de	Gebied	Begin van de
O_012	152	O_009	154
O_006	153	O_011	154
O_011	153	O_012	154
O_009	154	O_006	159
O_016	154	O_014	160
O_014	160	O_013	165
O_013	167	D_019	169
O_005	168	O_005	180
O_041	169	O_001	182
D_019	176	O_008	186
O_001	187	O_020	187
O_017	187	O_016	192
O_008	190	O_007	202
O_018	193	O_021	225
O_020	197	D_027	239
O_007	201	O_028	247
O_021	202	O_018	248
O_015	225	O_015	255
O_025	227	D_023	257
D_027	246	O_022	258
O_022	250	O_024	259
O_028	251	O_025	260
D_023	252	O_029	262
O_024	253	O_017	264
O_029	260	O_002	265
O_002	265	O_030	276
O_030	279	D_026	281
D_026	284		

Figuur 5-2 geeft een overzicht van de *stroomwegen* achter de waterkeringen voor het scenario 1995_DB en hoogwater HW824. Hier wordt duidelijk dat er achter de waterkeringen, parallel aan de Rijn, grote hoeveelheden water zullen stromen. Voor een deel zal het water meer stroomafwaarts weer in de Rijn terugstromen, maar voor een deel zal het water naar verderop gelegen, lagere polders stromen en de Rijn niet meer bereiken. Een vergelijking met Figuur 5-3 geeft slechts kleine kwalitatieve veranderingen te zien na de dijkversterkingen in het scenario 2020.



Figuur 5-2: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 1995_DB HW824mitDueb, kwalitatieve gegevens.



Figuur 5-3: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 2020_DB HW824mitDueb, kwalitatieve gegevens.

In kwantitatief opzicht geven de situaties van 1995 en 2020 wel degelijk verschillen te zien ten aanzien van de topafvoeren in de stromingen die parallel aan de Rijn achter de waterkeringen weer naar de Rijn terugvloeien (Bijlage 4-5 en Bijlage 4-6).

6 Effect van overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen op de topafvoeren en topwaterstanden van de Rijn

6.1 Inleiding

Een van de essentiële doelstellingen van dit project is om inzicht te krijgen in de effecten van de waterstandreducerende maatregelen langs de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken. Tijdens het project bleek dat deze effecten zeer sterk samenvallen met de effecten die de overstromingen hebben op de afvoer in de Rijn en dat deze twee fenomenen elkaar beïnvloeden. Daarom wordt hieronder nader ingegaan op het effect van beide processen.

Om te beginnen moet worden beschreven welke effecten de overstromingen en de hoogwaterreducerende maatregelen hebben op de (top)afvoer in de Rijn (hoofdstuk 6.2). Voor dit doel wordt niet alleen de afvoer bestudeerd die in de hoofdriever tussen de dijken wordt afgevoerd (buitendijks), maar ook de totale afvoer die in de hoofdriever en parallel aan de Rijn achter de dijken (binnendijks) wordt afgevoerd.

Hoofdstuk 6.3 behandelt de effecten van overstromingen en waterstandreducerende maatregelen op de waterstanden in de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken.

In hoofdstuk 6.4 wordt de relatie gelegd met het Actieplan Hoogwater van de ICBR.

Ter afsluiting wordt in hoofdstuk 6.5 een samenvatting gegeven.

Meer details zijn te vinden bij Mehlig (2004) en Van der Veen et al. (2004b).

6.2 Ontwikkeling van de topafvoer van de Rijn

6.2.1 Effect van de overstromingen op de afvoer van de Rijn

Figuur 6-1 illustreert de ontwikkeling van de topafvoer langs de Niederrhein voor de toestand in 1995 (boven) en 2020 (onder), beide zonder hoogwaterreducerende maatregelen. Zoals bij de figuren in Bijlage 5 zijn hier de topafvoeren weergegeven van de niet-stationaire berekeningen in het lengteprofiel. Voor beide toestanden (1995 en 2020) zijn in Figuur 6-1 steeds drie afvoertypen weergegeven:

- de afvoer in de Rijn Q_g , zoals deze wordt berekend als ervan wordt uitgegaan dat de gehele afvoer tussen de dijken kan plaatsvinden ($1995_O_Q_g$ respectievelijk $2020_O_Q_g$),
- de afvoer in de Rijn Q_f , die tussen de dijken (in de hoofdriever) wordt afgevoerd, waarbij met overstromingen rekening wordt gehouden ($1995_M_Q_f$ respectievelijk $2020_M_Q_f$), én
- de totale afvoer Q_g bestaande uit de afvoer die tussen de dijken blijft, samen met de hoeveelheid afvoer die parallel aan de Rijn achter de dijken stroomt en later weer terugstroomt in de Rijn ($1995_M_Q_g$ respectievelijk $2020_M_Q_g$).

Als de effecten van de overstromingen buiten beschouwing blijven, wordt duidelijk dat de afvoeren volgens verwachting aanzienlijk hoger zijn dan wanneer rekening wordt gehouden met waterverlies als gevolg van het overstromen van de waterkeringen. Ook kan worden vastgesteld dat de parallelle afvoer achter de dijken in drie gebieden een belangrijke rol speelt (verschil 1995_M_Qg en 1995_M_Qf respectievelijk 2020_M_Qg en 2020_M_Qf). In de gedeelten van de rivier die daartussen liggen worden de topafvoeren door overstromingen gereduceerd zonder dat er parallelle stroombanen ontstaan die weer naar de Rijn terugvloeien. Vanaf de monding van de Ruhr vindt er praktisch geen extra waterverlies ten gevolge van overstromingen meer plaats. De enige uitzondering in toestand 1995 wordt gevormd door het overstromen van de keermuur bij Emmerich (Rijn-km 845).

De dijkversterkingen tot 2020 beïnvloeden bij het hoogwater HW824 zowel de totale afvoer Qg als de afvoer in de hoofdriever Qf, evenals de verdeling tussen deze deelstromen.

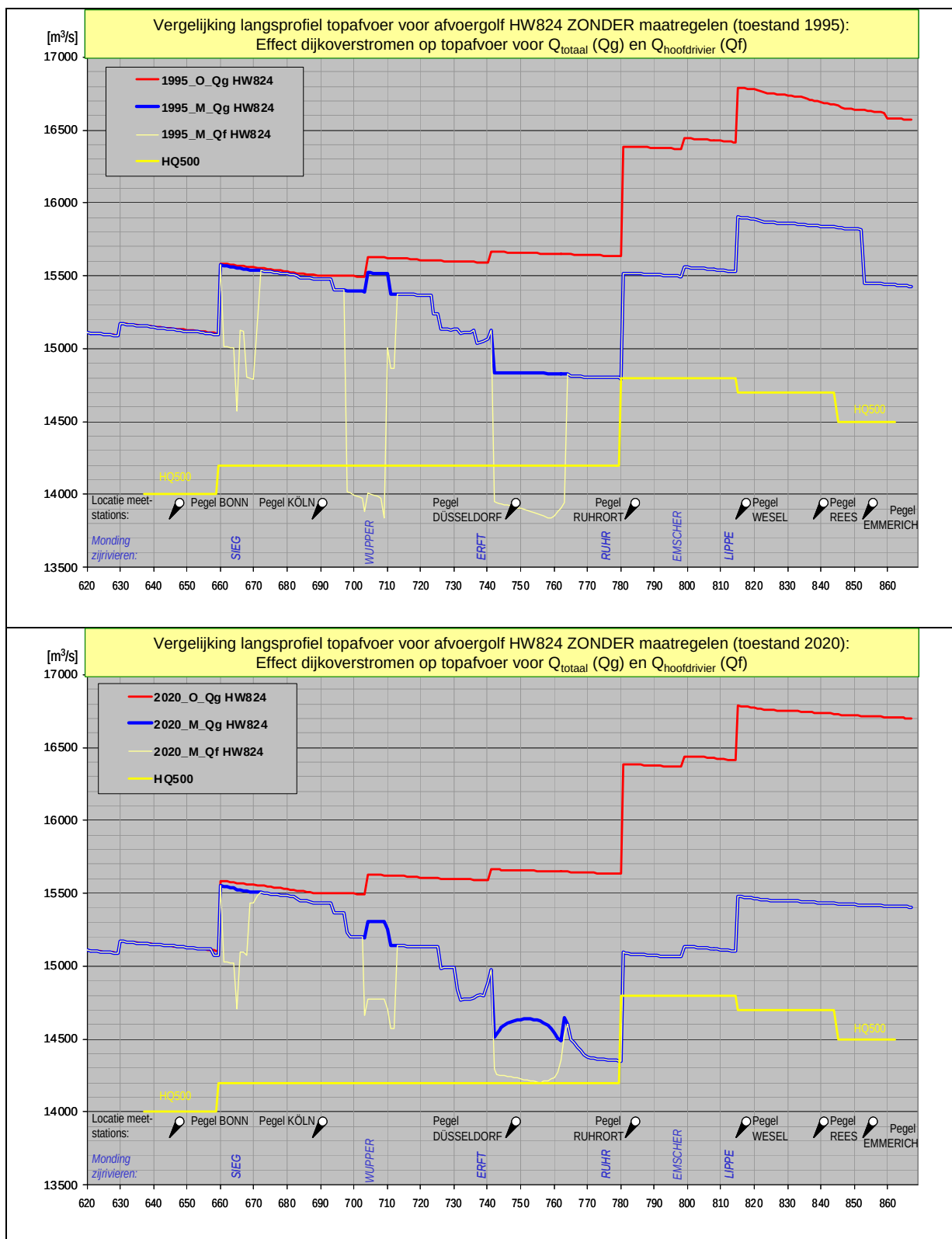
De afvoeren parallel achter de dijken zullen in 2020 in alle drie relevante gebieden geringer zijn. Dit is een verbetering vergeleken bij 1995, omdat dit vermoedelijk ook gepaard gaat met een geringere stromingsdynamiek.

De totale afvoer is vanaf de monding van de Sieg kleiner, terwijl tegelijkertijd ter hoogte de drie betreffende gebieden de afvoer in de hoofdriever is toegenomen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de dijkversterking en het dichtn van ontbrekende schakels in de waterkering vooral in het gedeelte tussen Köln en Düsseldorf ertoe zal leiden dat de waterkeringen pas in een later stadium zullen overstromen. Daardoor gebeurt dit dichtn bij de topwaarde van de afvoer, wat met betrekking tot het reduceren van de hoogwaterpiek effectiever is.

In het referentiejaar 1995 leiden de overstromingen in Emmerich tot een duidelijke vermindering van de topafvoer bij Lobith. Door de dijkversterking en het dichtn van de ontbrekende schakels in de waterkering in het gebied van Emmerich vinden hier geen overstromingen meer plaats en dus ook geen reduceringen van topafvoer. De topafvoer in Lobith verandert echter voor het referentiejaar 2020 nauwelijks ten opzichte van 1995 omdat er reeds een sterke demping heeft plaatsgevonden in het gebied bovenstrooms van Emmerich.

De dijkversterkingen en het dichtn van de ontbrekende schakels in de waterkering langs de Niederrhein zullen dus in het referentiejaar 2020 bij hoogwatersituatie HW824 leiden tot:

- een verbetering van de lokale waterkering
- een vermindering van de stromen achter de dijken bij overstromingen
- een vermindering van de topafvoeren van de Niederrhein vanaf de monding van de Sieg.



Figuur 6-1: Langprofiel topafvoeren in de Rijn:
 boven: toestand 1995/2002 zonder hoogwaterreducerende maatregelen
 onder: toestand 2020 zonder hoogwaterreducerende maatregelen.

6.2.2 Effect van de overstromingen en de hoogwaterreducerende maatregelen op de afvoer in de Rijn bij verschillende hoogwaters

Welk effect hebben de overstromingen op de topafvoeren bij andere hoogwatersituaties en welke invloed hebben de hoogwaterreducerende maatregelen?

Uit de enorme hoeveelheid resultaten dient voor de beantwoording van deze vraag aan de hand van een aantal uitgekozen hoogwatersituaties een overzicht te worden gegeven m.b.t. de ontwikkeling van de *totale* topafvoer langs de Niederrhein (som afvoer buitendijks én binnendijks). Behalve de topafvoeren van het hoogwater van januari 1995 (MET95) worden drie synthetische hoogwatersituaties weergegeven die zich in het bereik van HQ₁₀₀ (hoogwater HW457), HQ₂₀₀ (hoogwater HW846) en HQ₅₀₀ (hoogwater HW036) bevinden, evenals de afvoergolf met de hoogste afvoer op de meest stroomafwaarts gelegen delen van de Niederrhein (HW824). Weergegeven worden alleen de resultaten van de berekeningen met dijkoverstroming/dijkdoorbraak. Deze bevinden zich in de Bijlage 5-1 tot en met Bijlage 5-5. Weergegeven worden de *totale* topafvoer (som afvoer binnendijks én buitendijks, bovenste figuur) en de topafvoer van alleen de *hoofdrivier* (alleen afvoer buitendijks, onderste figuur).

Bij bestudering van de figuren wordt in eerste instantie duidelijk dat bij de twee kleinere hoogwatersituaties (MET95, Bijlage 5-1 en HW457, Bijlage 5-2) geen verschil te zien is tussen de *totale* topafvoer en topafvoer van alleen de *hoofdrivier*. Pas bij het hoogwater HW846 en nog meer bij HW036 en HW824 worden de verschillen aanzienlijk.

Bij de kleinere hoogwaters (Bijlage 5-1 en Bijlage 5-2) nemen zowel de *totale* topafvoer (som afvoer binnendijks én buitendijks) alsmede topafvoer in de *hoofdrivier* in het traject tussen de monding van de zijrivieren geleidelijk af. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat rivierwater in het grondwater verdwijnt en vooral ook door de golfvorming als gevolg van berging in de uiterwaarden.

Naarmate de omvang van de hoogwaters toeneemt, valt vooral in het gebied tot Rijn-km 770 een meer trapsgewijze afname waar te nemen ten aanzien van de topafvoeren (Bijlage 5-3 tot en met Bijlage 5-5). Dit wordt veroorzaakt door de toenemende overstromingen van de tegen hoogwater beschermde gebieden en de waterverliezen die daarmee samenhangen. Bij de topafvoer in de *hoofdrivier* kan het al genoemde „instorten” worden waargenomen, omdat een aanzienlijk deel van de afvoer achter de dijken plaatsvindt (binnendijks).

Bij nadere bestudering valt op dat de scenario's 1995_M en 2002_NRW_M zich in zeer sterk mate hetzelfde gedragen, zo ook de scenario's 2020_M , 2020_NRW_NL_M en 2020_NRWMAX_M. Dit betekent dat scenario's met dezelfde dijkhoogte bij een onderlinge vergelijking zich naar verhouding op dezelfde manier gedragen. Dit is terug te voeren op het feit dat de dijkhoogte, en daarmee de dijkoverstroming/dijkdoorbraak, met betrekking tot de topafvoer de dominerende factor is terwijl het effect van de waterstandreducerende maatregelen op de afvoer duidelijk geringer is. Bij de vier „kleinere” extreme hoogwaters in het bereik van het hoogwater van 1995 tot HQ₅₀₀ (Bijlage 5-1 tot en met Bijlage 5-4) wordt de topafvoer na de dijkversterkingen hoger, bij de grootste van de bestudeerde hoogwaters (HW824, Bijlage 5-5) echter kleiner. Door de waterkeringen aan het vereiste beschermingsniveau aan te passen worden de maximale waarden van hogere extreme hoogwaters effectiever verlaagd (groter retentie effect).

Bijzonder duidelijk springen de reduceringen van de topafvoeren door dijkoverstroming/dijkdoorbraak bij de twee weergegeven grotere hoogwaters HW036 en HW824 (Bijlage 5-4 en Bijlage 5-5) in het oog. In het gedeelte tot Düsseldorf valt een trapsgewijze afname van de topafvoeren bij alle scenario's waar te nemen. In de figuren van het lengteprofiel van de afvoer in de *hoofdrivier* wordt deze afname door de al beschreven "kuilen" onderbroken. Daarbij treden in het lengteprofiel vooral tussen Rijn-km 710 tot 770 fenomenen op die slechts kunnen worden verklaard door de gecompliceerde wisselwerking tussen de overstromingen in de achter de dijken gelegen afzonderlijke polders. Bijvoorbeeld treedt er bij het hoogwater HW036 bij Rijn-km 738 in de scenario's 2020_NRW_NL_M en 2020_NRWMAX_NL_M een dijkdoorbraak op. Door het gat in de waterkering wordt een waterhoeveelheid onttrokken, waardoor er lokaal een daling van de waterstand ontstaat. Het daardoor veroorzaakte energieverhang leidt bovenstrooms van de doorbraaklocatie tot een hogere afvoer in de Rijn (Bijlage 5-4). De dijkdoorbraak bij Rijn-km 738 zorgt ervoor dat bij Rijn-km 741 geen dijkdoorbraak meer ontstaat. Het ongewone verloop van de *totale* topafvoer in het lengteprofiel, die bij hoogwater HW824 tussen Rijn-km 741 en 780 optreden, kunnen worden verklaard door het gecompliceerde stromingsgedrag dat bij de overstromingen achter de dijken ontstaat. In de figuur van de afvoer in de hoofdrivier is dit rare verloop niet terug te vinden.

In de meer stroomafwaarts gelegen gebieden treden bij beide hoogste hoogwaters (HW036, Bijlage 5-4 en HW824, Bijlage 5-5) bovendien nog overstromingen in de buurt van Emmerich op (Rijn-km 851) die een duidelijke vermindering van de afvoer tussen de dijken tot gevolg hebben. Deze zijn echter slechts beperkt tot de scenario's 1995_M en 2002_NRW_M. Na de aanleg van de keermuur bij Emmerich (scenario's 2020_NRW_NL_M en 2020_NRWMAX_NL_M) zal dit verschijnsel zich niet meer voordoen.

In enkele gevallen wordt het effect van afzonderlijke maatregelen zichtbaar:

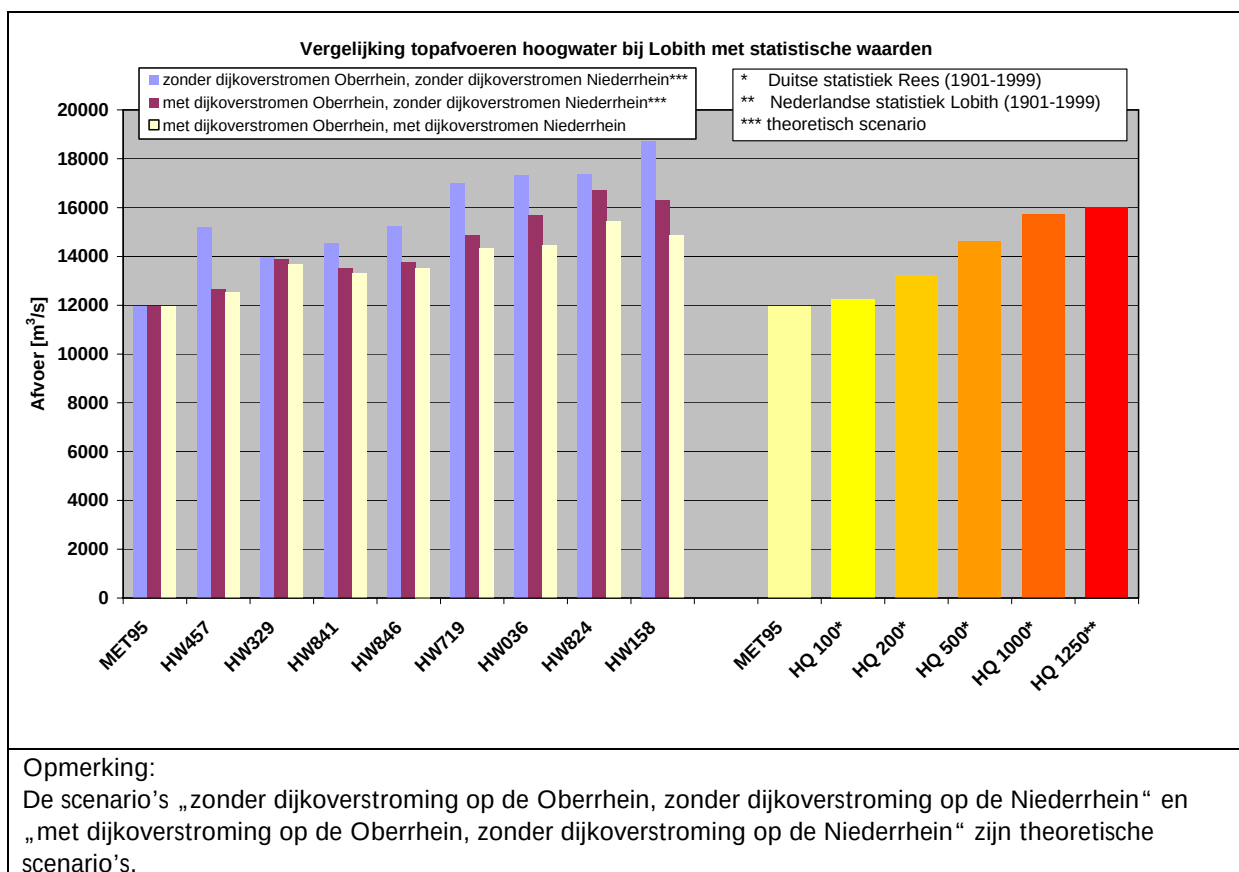
- Uitgevoerd volgens het huidige ontwerp heeft de retentiemaatregel Worringen een topstandreducerend effect op het hoogwater van 1995 (Bijlage 5-1, scenario 2020_NRW_NL_M, Rijn-km 710). Bij een beter op de maatgevende afvoer afgestemde variant (scenario 2020_NRWMAX_NL_M) valt geen effect te herkennen.
- Op het hoogwater HW846 (in het bereik van de HQ_{200}) heeft de maatregel Worringen echter alleen in scenario 2020_NRWMAX_NL_M een reducerend effect op de topafvoer als gevolg van de bovengenoemde redenen, terwijl de maatregel volgens het huidige ontwerp al is volgelopen voordat de topwaarde wordt bereikt (Bijlage 5-3).
- Het voorbeeld Ilvericher Bruch (Rijn-km 752) laat zien dat het effect van de retentiemaatregelen op de topafvoer sterk afhangt van de afvoergolf. Geen enkele van de weergegeven hoogwaters wordt ten aanzien van de topwaarden door deze maatregel beïnvloed, omdat deze ofwel te hoog ofwel te laag liggen.
- Bij het hoogwater HW036 (in het bereik van HQ_{500}) wordt het effect van de op deze afvoer afgestemde maatregel „Orsoyer Bogen“ bij Rijn-km 800 zichtbaar in scenario 2020_NRWMAX_NL_M (Bijlage 5-4).
- Bij de hoogste van de bestudeerde hoogwatersituaties, d.w.z. hoogwater HW824, wordt het effect van de Bylerward (Bijlage 5-5) zichtbaar in scenario 2020_NRWMAX_NL_M. Hier laat zich het verschijnsel zien dat tijdens het vollopen van een retentiegebied stroomopwaarts tijdelijk een verhoogde afvoer (geen hogere waterstand!) kan ontstaan, wat ook tot een verhoging van de topafvoeren kan leiden.

-
- Bij kleinere extreme afvoeren (MET95 en HW846) hebben de maatregelen Griether Busch en Lohrwardt (Rijn-km 835 tot 848) een reducerend effect op de topafvoer (Bijlage 5-1 en Bijlage 5-2).
 - Maatregelen die het stroomprofiel vergroten, hebben geen of maar een beperkt effect op de topafvoer, maar kunnen door het ruimere dwarsprofiel de waterstanden plaatselijk doen dalen.

In de Bijlage 6-1 tot en met Bijlage 6-5 wordt een overzicht gegeven van de berekende topafvoeren voor de belangrijkste meetstations langs de Niederrhein voor de belangrijkste vijf scenario's 1995, 2002_NRW, 2020, 2020_NRW_NL en 2020_NRWMAX_NL. Deze berekeningen werden elk uitgevoerd mét en zónder dijkoverstromingen langs de Niederrhein. Hieruit blijkt opnieuw dat de grotere extreme hoogwaters sterk worden beïnvloed door dijkoverstromingen in het gebied tot Düsseldorf/Krefeld. De topafvoeren in de berekeningen met een dijkoverstroming stijgen echter naarmate het hoogwater toeneemt. Niet zichtbaar wordt of de topafvoer bijvoorbeeld voor Lobith naar een grenswaarde oplopen die niet kan worden overschreden. Op basis van deze berekeningen kan geen conclusie worden getrokken ten aanzien van een fysisch maximum.

De belangrijkste reden hiervoor is het feit dat een groot deel van het water, dat bovenstrooms van Düsseldorf over de dijken stroomt, weer terugvloeit. Voor het meetstation Düsseldorf heeft dit tot gevolg dat de afvoer Q_f , die in de Rijn tussen de dijken (dus in de hoofdriever) wordt afgevoerd, kleiner is dan de totale afvoer Q_g , welke bestaat uit de deelstroom die tussen de dijken wordt afgevoerd en de stroom die parallel aan de Rijn achter de dijken stroomt.

Om een overzicht te geven ten aanzien van de vraag hoe extreem de „extreme“ hoogwaters zijn, zijn de berekende topafvoeren bij Lobith van de onderzochte hoogwaters analoog aan hoofdstuk 4.4 tegenover statistische afvoerwaarden gezet. In dit geval echter met de waarden voor het scenario „met dijkoverstroming Oberrhein EN met dijkoverstroming Niederrhein“.



Figuur 6-2: Vergelijking tussen hoogwatertoppen met statistische waarden.

6.3 Effect van de hoogwaterreducerende maatregelen op de waterstanden in de Rijn

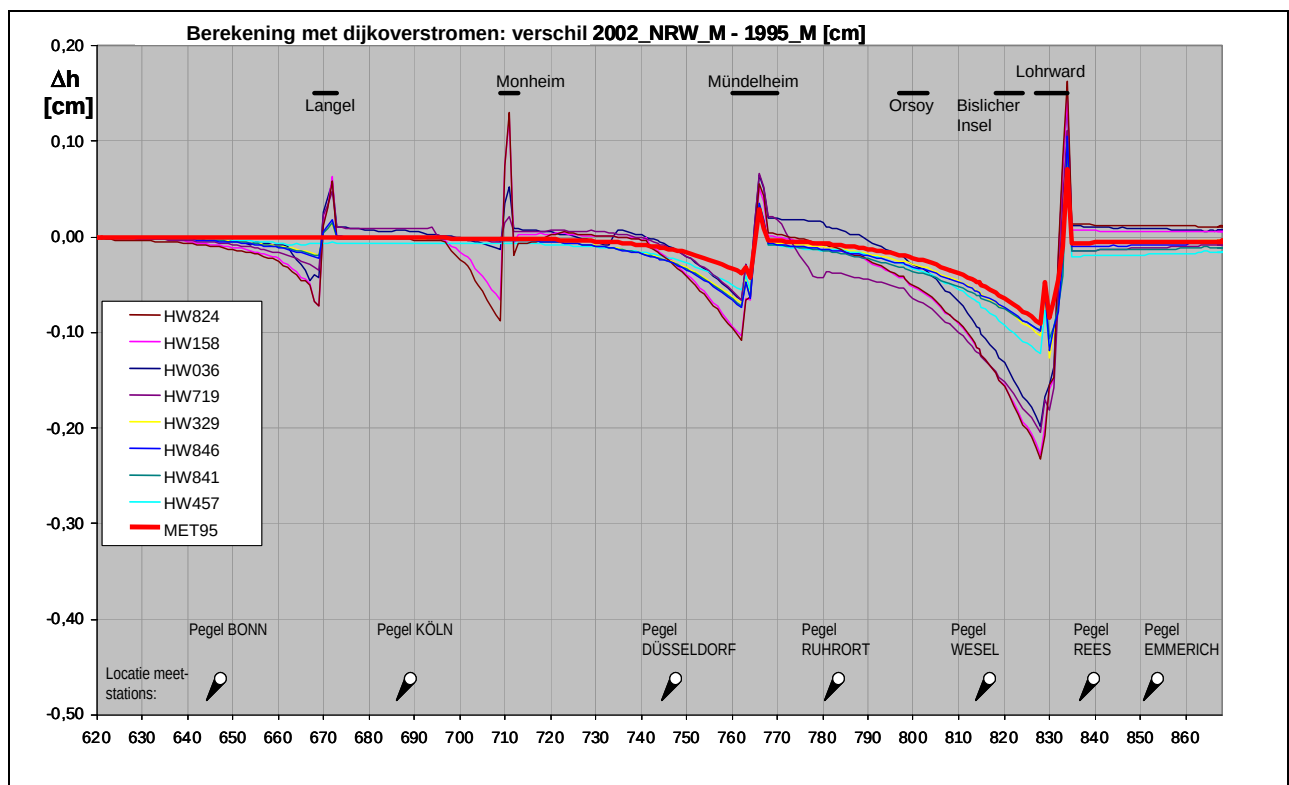
6.3.1 Inleiding

Een belangrijk doel van de hoogwaterreducerende maatregelen is dat de waterstand, vooral in het bereik van de piek van de hoogwatergolf, wordt verlaagd. Daarom moet het effect van de hoogwaterreducerende maatregelen op de topwaterstanden langs de Niederrhein worden weergegeven. Hiervoor werden de voor ieder profiel in het 1D-model (DSS/SOBEK) berekende maximale waterstanden van een scenario gerelateerd aan het scenario van het betreffende referentiejaar zonder maatregelen. Voor de weergave van het effect van de maatregelen worden bijvoorbeeld de topwaterstanden van het scenario 1995_M (waarbij geen rekening wordt gehouden met waterstandreducerende maatregelen maar wel met de dijkhoogtes van 2002) van de topwaterstanden van het scenario 2002_NRW_M afgetrokken. Negatieve waarden drukken een waterstandreducerend effect uit en positieve waarden duiden op een verhoging van de waterstand.

Op dezelfde wijze werden de scenario's 2020_NRW_NL_M en 2020_NRWMAX_NL_M (en eventueel ook de varianten daarvan) behandeld. Hier wordt de vergelijking echter uitgevoerd met de resultaten van het scenario 2020_M, dat (zoals alle scenario's voor 2020) de dijkhoogtes in 2020 weergeeft, echter zonder waterstandreducerende maatregelen.

6.3.2 Effect van de reeds gerealiseerde maatregelen (toestand 2002)

Het effect van de maatregelen die in 2002 al zijn gerealiseerd, wordt in Figuur 6-3 weergegeven.



Figuur 6-3: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Huidige toestand (verschil scenario 2002_NRW_M – 1995_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

Zes waterstandreducerende maatregelen zijn al gerealiseerd, respectievelijk staan kort voor de voltooiing en worden daarom in de berekeningen voor de „toestand 2002“ betrokken als zijnde reeds gerealiseerd (zie ook Tabel 3-5):

- de *dijkterugleggingen* Monheim, Mündelheim en Orsoy Land.
- Köln-Langel en Lohrwardt, die beide in het lagere afvoergebied als *retentiepolder met een vaste overlaat* functioneren, maar waar het water bij stijgende waterstanden respectievelijk afvoeren ook *doorheen zal stromen*, waardoor dus lokaal een groter doorstroomprofiel ontstaat.
- Bislicher Insel, een dijkteruglegging waarbij de aangepaste, oude bandijk ervoor zorgt dat het systeem feitelijk als een retentiepolder met vaste overlaat functioneert.

Duidelijk herkenbaar is het maximale waterstandreducerende effect van de afzonderlijke maatregelen in het gebied van de maatregelen zelf en ook het gestadig toenemende effect bovenstrooms tot aan de maatregel. Dit wordt veroorzaakt door de vergroting van het stroomprofiel in het gebied van de maatregel, wat bij dezelfde (of hogere) afvoeren tot lagere waterstanden leidt. Een vermindering van de waterstand heeft bovenstrooms een groter energieverhang tot gevolg wat vervolgens tot een grotere stroomsnelheid kan leiden. Ook dit effect leidt ertoe dat er bij dezelfde of zelfs bij iets hogere afvoeren een vermindering van de waterstand ontstaat.

Als men de lokale verruiming van het doorstroomprofiel (bijvoorbeeld door dijkteruglegging) in de stroomrichting bekijkt, valt waar te nemen dat naar het einde van de maatregel toe vaak een versmalling van het doorstroomprofiel ontstaat. Bij de overgang naar de bestaande dijk kan daardoor een kleine opstuwing ontstaan. Dit heeft tot gevolg dat direct benedenstrooms van de maatregelen Köln-Langel, Monheim, Mündelheim en Lohrwardt lokaal hogere waterstanden ontstaan.

Alle maatregelen laten hun grootste effect bij de grotere hoogwatersituaties zien.

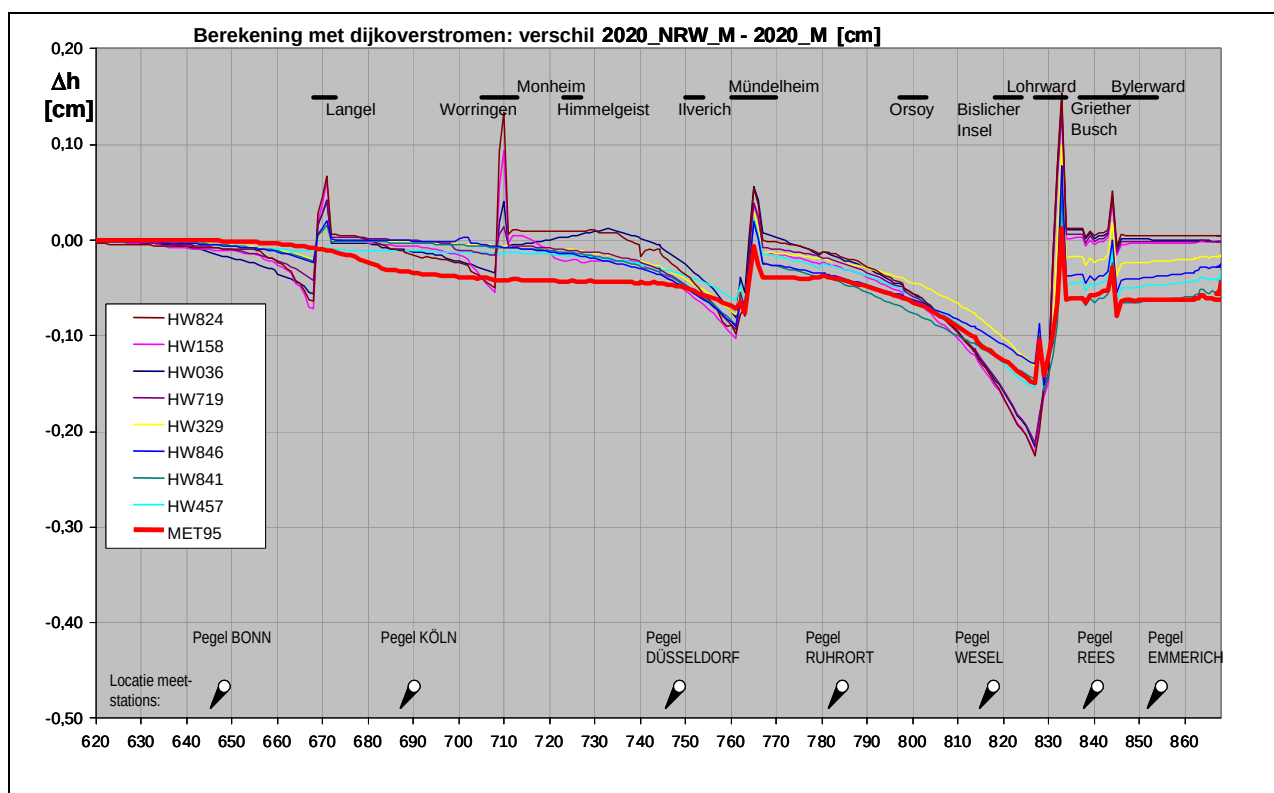
Binnen het gehele spectrum van de onderzochte hoogwaters laten alle maatregelen een effect zien op de topwaterstanden. De maatregel bij Monheim vormt de enige uitzondering. De relatief hoge leidam zorgt ervoor dat het betreffende retentiegebied pas bij hogere waterstanden wordt doorstroomd en er dan pas een duidelijke reducering van de waterstand ontstaat.

Effecten van de maatregelen Orsoy Land en Bislicher Insel kunnen niet duidelijk worden waargenomen, omdat deze relatief klein zijn. Bovendien is sprake van een sterke overlapping met de maatregel bij Lohrwardt.

Het grensoverschrijdende effect van de waterstandreducerende maatregelen in NRW is in de huidige toestand (2002) uiterst gering, de maatregelen in Nederland zijn nog niet gerealiseerd.

6.3.3 Effect van de in NRW geplande maatregelen (zonder maatregelen in Nederland)

Het effect van de maatregelen die in NRW voor 2020 gerealiseerd dienen te worden, is in Figuur 6-4 weergegeven. Met de in Nederland geplande maatregelen is geen rekening gehouden.



Figuur 6-4: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Geplande toestand 2020 in alleen NRW (verschil scenario 2020_NRW_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

In totaal wil men voor 2020 elf hoogwaterreducerende maatregelen realiseren (kleinere, zeer lokaalgebonden maatregelen worden hier niet meegeteld):

- De *dijkterugleggingen* Monheim, Mündelheim, Orsoy Land en Itter-Himmelgeist.
- De gestuurde, maar niet doorstroomde *retentiepolers* Worringer Bruch, Ilvericher Bruch en Bylerwardt.
- Köln-Langel en Lohrwardt, die beide in het lagere afvoergebied als *retentiepoler met vaste overlaat* functioneren, maar waar het water bij stijgende waterstanden respectievelijk afvoeren ook *doorheen zal stromen*, waardoor dus lokaal een groter doorstroomprofiel ontstaat.
- De twee maatregelen Bislicher Insel en Griether Busch, die feitelijk als *retentiepolers met vaste overlaat* functioneren.

(zie ook Tabel 3-5).

In de eerste plaats valt op dat de effecten van de afzonderlijke maatregelen elkaar zo sterk overlappen dat hun afzonderlijke effecten nauwelijks nog herkenbaar zijn. Alleen de maatregelen Köln-Langel, Monheim, Mündelheim, Lohrwardt en Griether Busch zijn herkenbaar door hun opstuwende effect direct benedenstrooms van de maatregel als gevolg van de vernauwing van het doorstroomprofiel.

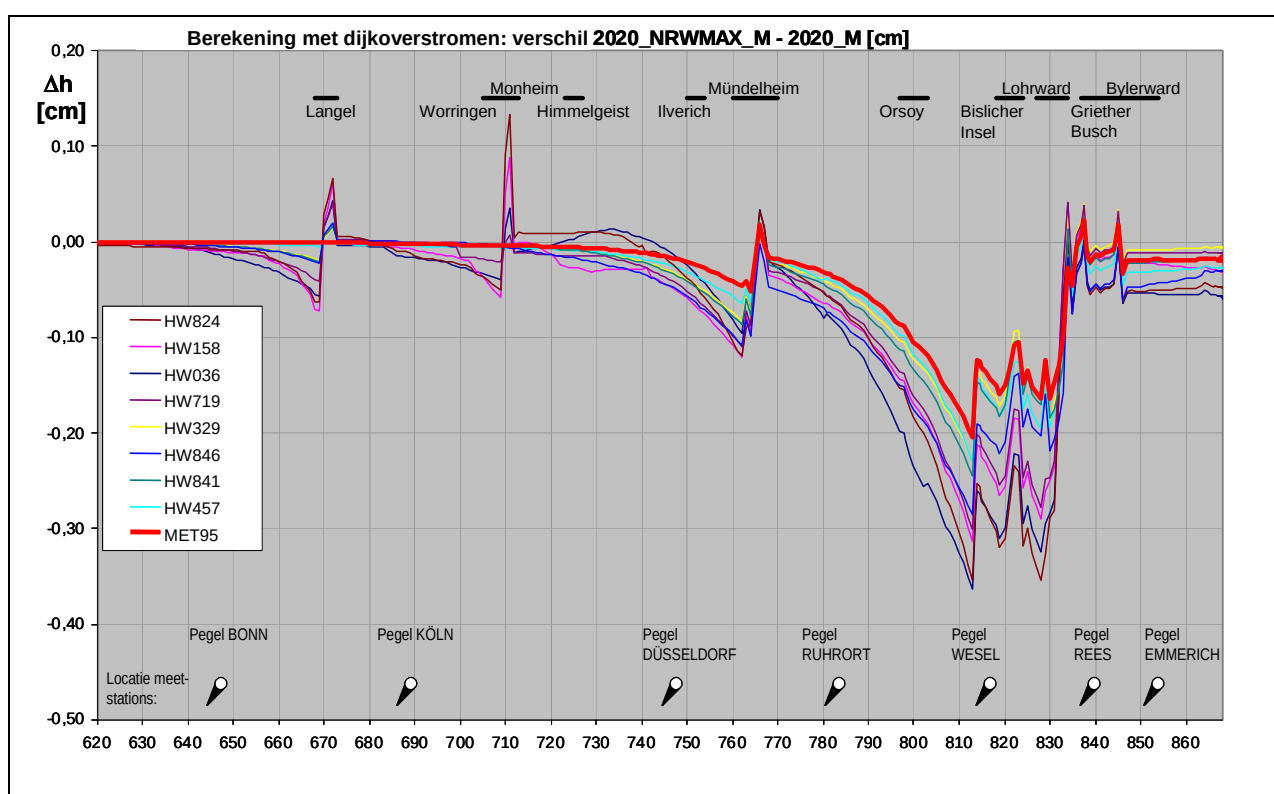
De maatregelen die vooral door de verruiming van het doorstroomprofiel effect hebben (Lohrwardt, Mündelheim, Monheim en Köln-Langel), beïnvloeden, zoals nu al in de huidige toestand, de grotere extreme hoogwaters HW824 en HW158 méér dan de kleinere. De afzonderlijke effecten van de andere maatregelen zijn nauwelijks herkenbaar. Een vergelijking tussen Figuur 6-4 en Figuur 6-3 duidt er echter op dat de maatregelen Worringer, Ilvericher Bruch,

Griether Busch en Bylerward vooral van invloed zijn op de kleinere hoogwaters (MET95, HW457). Over het geheel genomen laat het stelsel van hoogwaterreducerende maatregelen langs de Niederrhein in de huidige planning zijn beste totale effect zien bij gebeurtenissen die een vergelijkbare omvang hebben als het hoogwater van 1995.

6.3.4 Optimaliseren van de in NRW geplande maatregelen („NRW MAX-variant“)

Als aanvulling op de huidige toestand en de geplande toestand in NRW werd nog een variant voor de waterstandreducerende maatregelen in NRW berekend. Naast het feit dat rekening wordt gehouden met aanvullende maatregelen, worden in dit scenario de maatregelen Köln-Langel, Worrringer Bruch, Ilvericher Bruch en Bylerward op een zodanige wijze ingezet dat deze hoogwaters in het bereik van de maatgevende afvoer effectiever kunnen reduceren (zie Tabel 3-5).

Figuur 6-5 laat zien dat alleen door het latere vollopen van de retentiepolders Köln-Langel, Worrringer Bruch, Ilvericher Bruch en Bylerward en het inzetten van een aanvullende retentiepolder bij Orsoy en de doelgerichte verwijdering van hydraulische knelpunten in het gebied bij Bislicher Insel (zie ook Tabel 3-5), een effectievere verlaging van de topwaterstanden bij de grotere hoogwaters kan worden bereikt. Voor de lagere hoogwaters heeft deze aanpassing echter een vermindering van het effect tot gevolg.

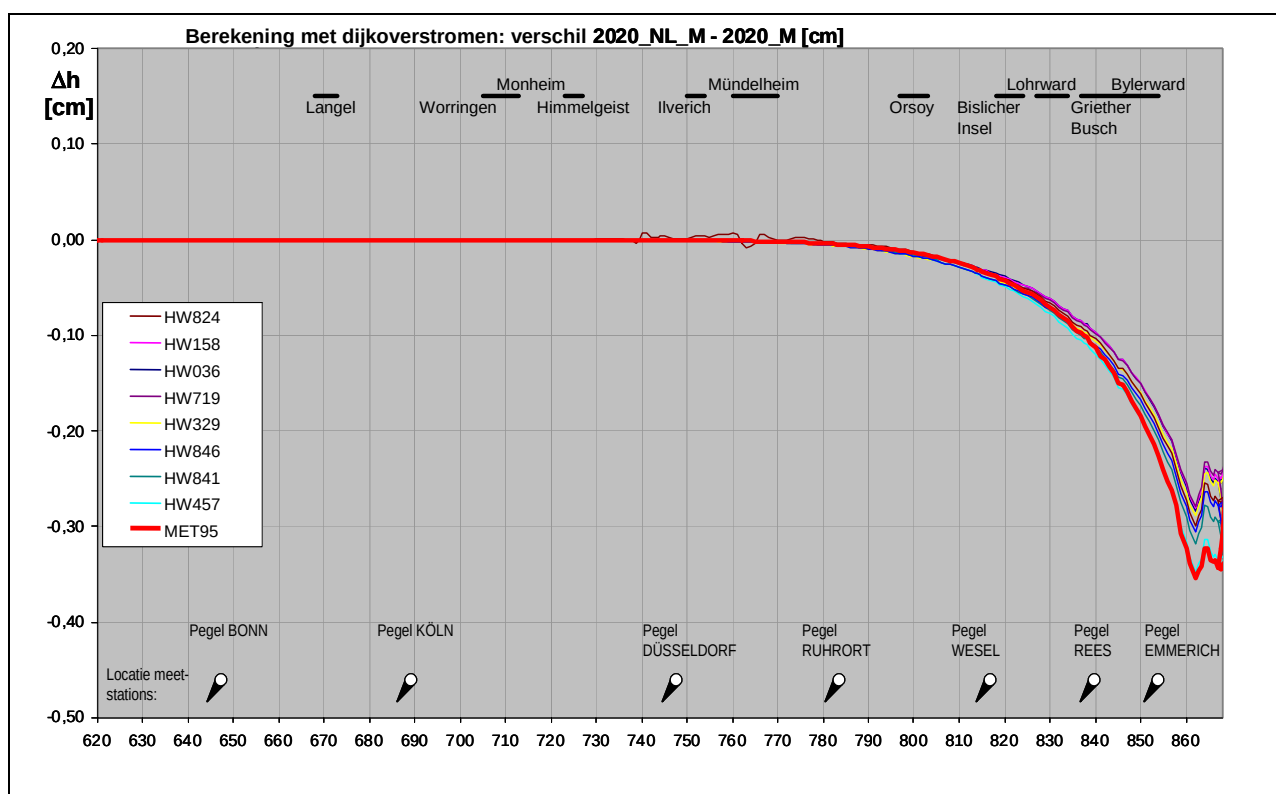


Figuur 6-5: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden. Geoptimaliseerde toestand 2020 alleen in NRW (verschil scenario 2020_NRWMAX_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

Zoals Figuur 6-4 en Figuur 6-5 illustreren, hebben de maatregelen in NRW, die aan de grens tot een verlaging van de topwaterstanden met maximaal 6 cm leiden, ook effect op de waterstanden in Nederland.

6.3.5 Effect van de Nederlandse maatregelen

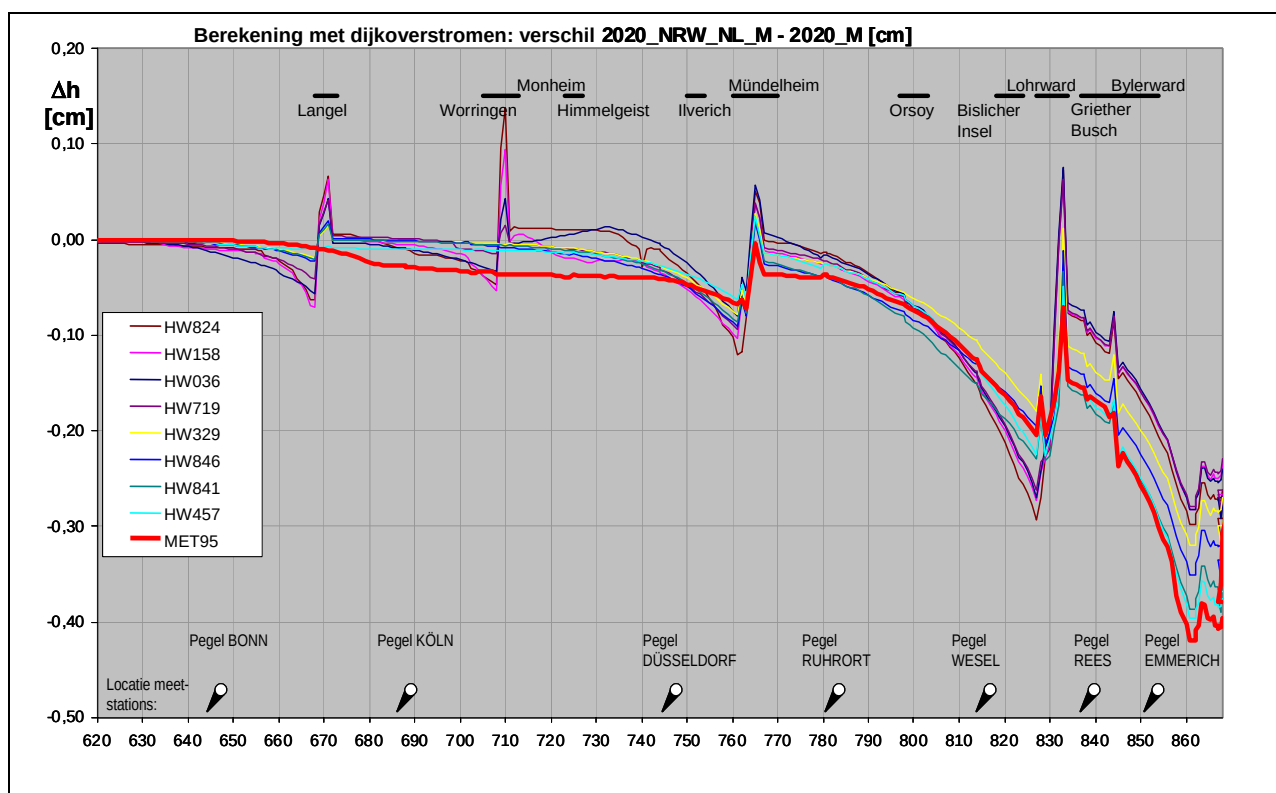
In Nederland wil men in de toekomst een afvoer kunnen afleiden die 1000 m³/s groter is dan op dit moment mogelijk is. Het doel is om dit door middel van waterstandreducerende maatregelen te bereiken, maar zonder de dijken te verhogen. Deze maatregelen hebben ook effect op de topwaterstanden in Duitsland (Figuur 6-6). Bij een verlaging van de waterstand met ongeveer 30 cm aan de grens wordt dit effect stroomopwaarts geleidelijk kleiner en kan het effect bij Rijn-km 810 niet meer worden aangetoond.



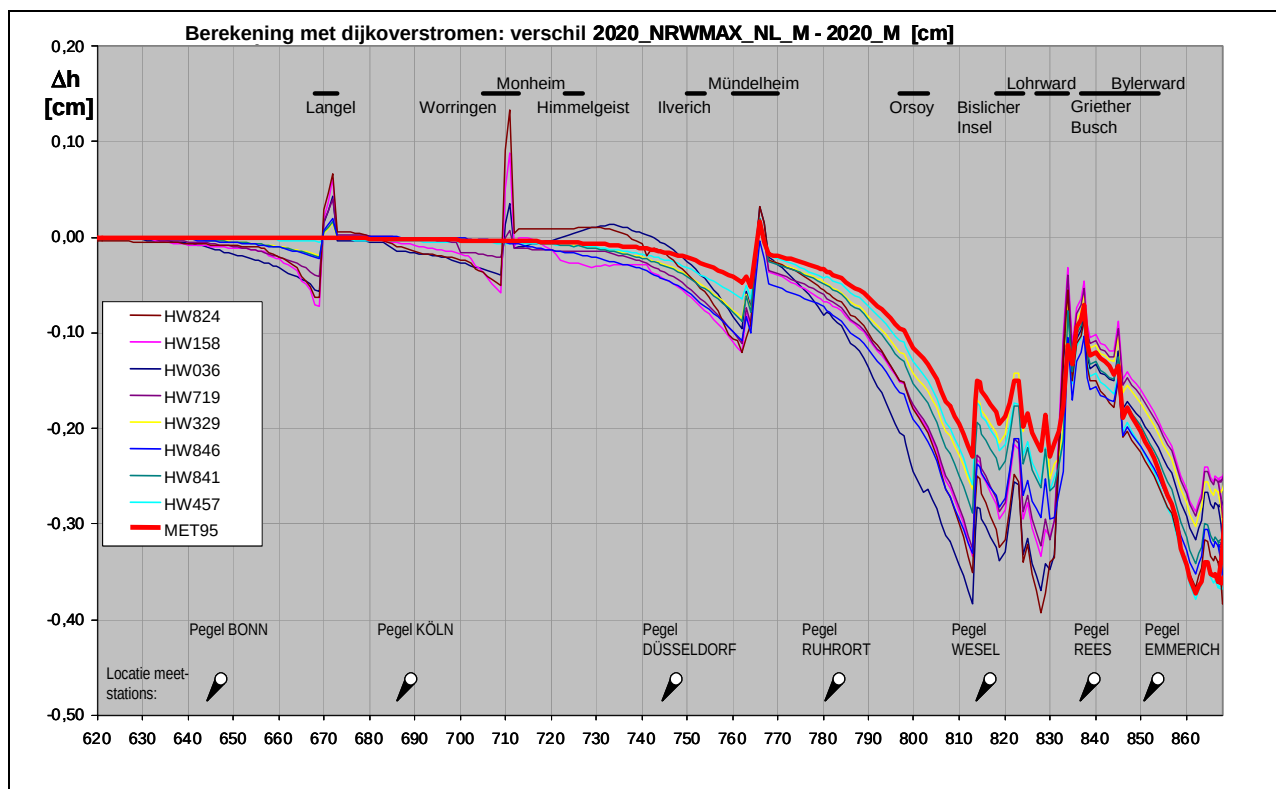
Figuur 6-6: Het effect van de geplande maatregelen op de topwaterstanden, geplande maatregelen in Nederland (verschil scenario 2020_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

6.3.6 Grensoverschrijdend effect van alle geplande maatregelen (NRW en NL)

In combinatie met het effect van de maatregelen in NRW zoals die op dit moment zijn gepland, kunnen voor de grotere extreme hoogwaters waterstandreducties worden bereikt van rond 30 cm bij de grens tot 25 cm in het gebied Bislich/Lohrwardt (Figuur 6-7). Bij een op de maatgevende afvoer afgestemde variant van de maatregelen in NRW en enkele extra maatregelen bij Orsoy en Bislich (NRWMAX-variant) kunnen bij de grens en in het gebied Bislich/Lohrwardt zelfs waterstandreducties tot 40 cm bereikt worden (Figuur 6-8).



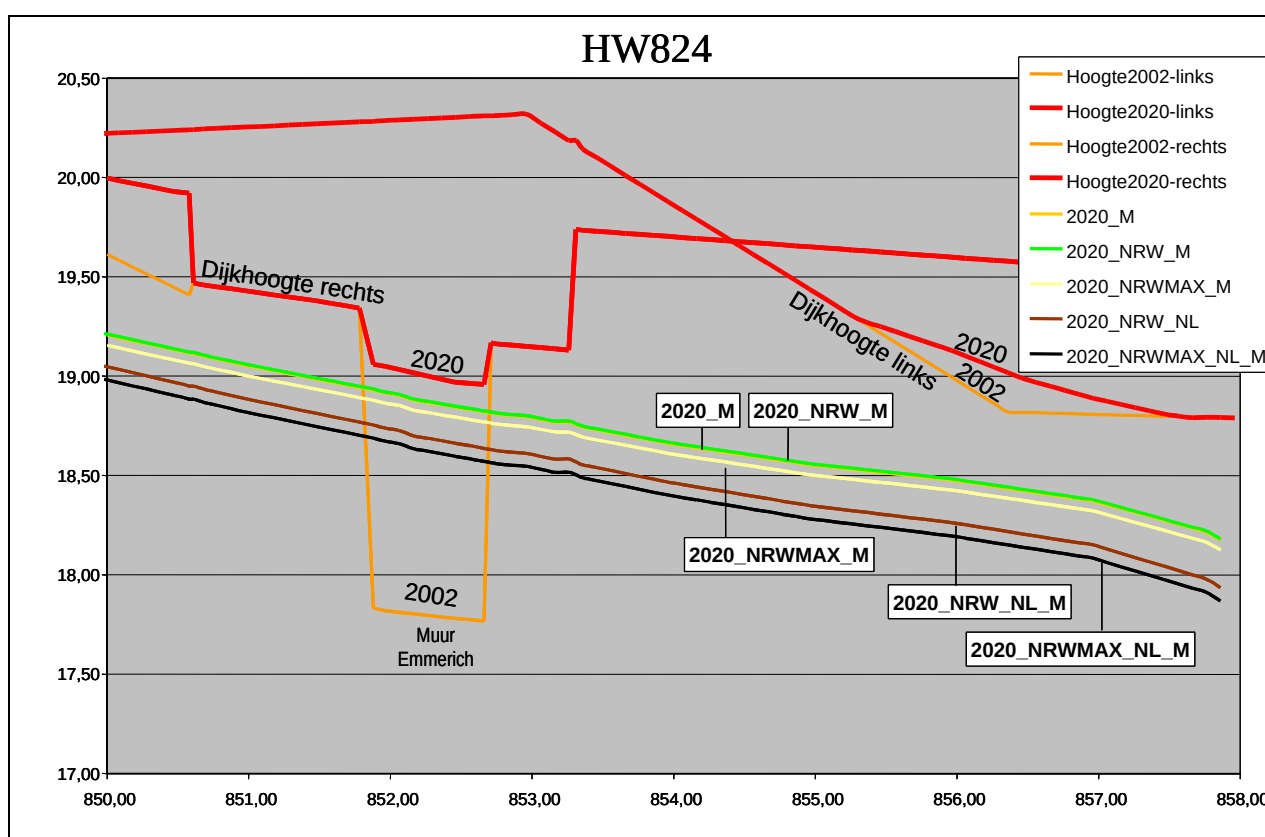
Figuur 6-7: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden, geplande toestand 2020 NRW en NL (verschil scenario 2020_NRW_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).



Figuur 6-8: Het effect van de maatregelen op de topwaterstanden, geoptimaliseerde toestand 2020 NRW en NL (verschil scenario 2020_NRWMAX_NL_M - 2020_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

Ook het inzetten van extra retentiemaatregelen op het Nederlandse grondgebied direct na de grens (Ooijpolder en Rijnstrangen) is stroomopwaarts tot Rijn-km 810 merkbaar (Mehlig, 2004; Van der Veen et al., 2004b). Deze maatregelen zouden het effect van de waterstandreducerende maatregelen in het grensgebied met ongeveer 20 cm extra verhogen.

Figuur 6-9 illustreert de relevantie van dit grensoverschrijdende effect van de maatregelen in NRW en in Nederland. Hier wordt duidelijk dat niet alleen de maatregelen in NRW met enkele centimeters, maar vooral ook de maatregelen in Nederland met gereduceerde topwaterstanden van 20 tot 30 cm een belangrijke bijdrage leveren bij het voorkomen van een situatie waarbij de keermuur in Emmerich overstroomt. Als er in het gebied dicht bij de grens in Nederland extra retentiemaatregelen worden ingezet („PLUS-scenario's“, zie Tabel 3-5), moet rekening worden gehouden met een extra verminderde topwaterstand van 1 tot 20 cm. Maatregelen in Nederland kunnen dus ook een bijdrage leveren om grensoverschrijdende overstromingen achter de dijken te voorkomen.



Figuur 6-9: Dijkhoogte en topwaterstanden in het gebied dicht bij de grens, HW824.

6.4 Relatie met het Actieplan Hoogwater van de ICBR

In januari 1998 werd tijdens de twaalfde ministersconferentie voor de Rijnsoeverlanden het Actieplan Hoogwater van de ICBR aangenomen (ICBR, 1998). Een van de doelstellingen van dit actieplan is om de hoogwaterstanden bij extreme afvoeren met ongeveer 70 cm te verminderen. „Maatgevend zijn de effecten op het hoogwater en de schadeverminderende effecten voor een heel scala van frequente en zeldzame hoogwatersituaties. Het bewijs van de effectiviteit van de op gang gebrachte en verwezenlijkte beschermings- en

voorzorgsmaatregelen wordt geleverd aan de hand van een reeks standaardhoogwatersituaties, waarmee het verloop van hoogwatersituaties in het stroomgebied van de Rijn wordt gesimuleerd" (ICBR, 1998). Daarbij wordt niet uitgelegd waar de waterstandvermindering van 70 cm op de Rijn moet worden bereikt. De effectbeoordeling van retentie in het stroomgebied van de Rijn (ICBR,1999) die aan het actieplan ten grondslag ligt, laat de conclusie toe dat dit cijfer voor het meetstation Lobith moet gelden. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat maatregelen langs de Niederrhein met 10 tot 30 cm aan een vermindering van de waterstand kunnen bijdragen en de maatregelen in Nederland met 10 tot 20 cm (ICBR, 1999).

Het in deze studie berekende grensoverschrijdende totaaleffect van waterstandreducerende maatregelen in NRW en Nederland bereikt met 40 cm de waarden die ook in de effectbeoordeling worden genoemd.

De in het Actieplan Hoogwater genoemde vergelijkingsmaatstaf is het jaar 1995. Daarom zou men strikt genomen alle maatregelenscenario's met het scenario van 1995 (1995_M) moeten vergelijken. Hierbij worden bij een vergelijking met het scenario 2020_NRW_M vooral de verschillende effecten van dijkoverstromingen zichtbaar (Figuur 6-10). Deze worden veroorzaakt door de dijkversterkingen en het dichtn van de ontbrekende schakels in de waterkering. De effecten van de retentiemaatregelen zelf zijn niet te onderscheiden of langs deze weg afzonderlijk aan te tonen. De resultaten van referentiejaar 2020 laten ten aanzien van de waterstanden grotendeels een verslechtering te zien ten opzichte van het referentiejaar 1995. Dit komt door het grotere "overstromingseffect" van de nog niet versterkte en dus lagere dijken in het referentiejaar 1995. Het effect van de hoogwaterreducerende maatregelen valt niet meer te onderscheiden van de effecten van de overstromingen.

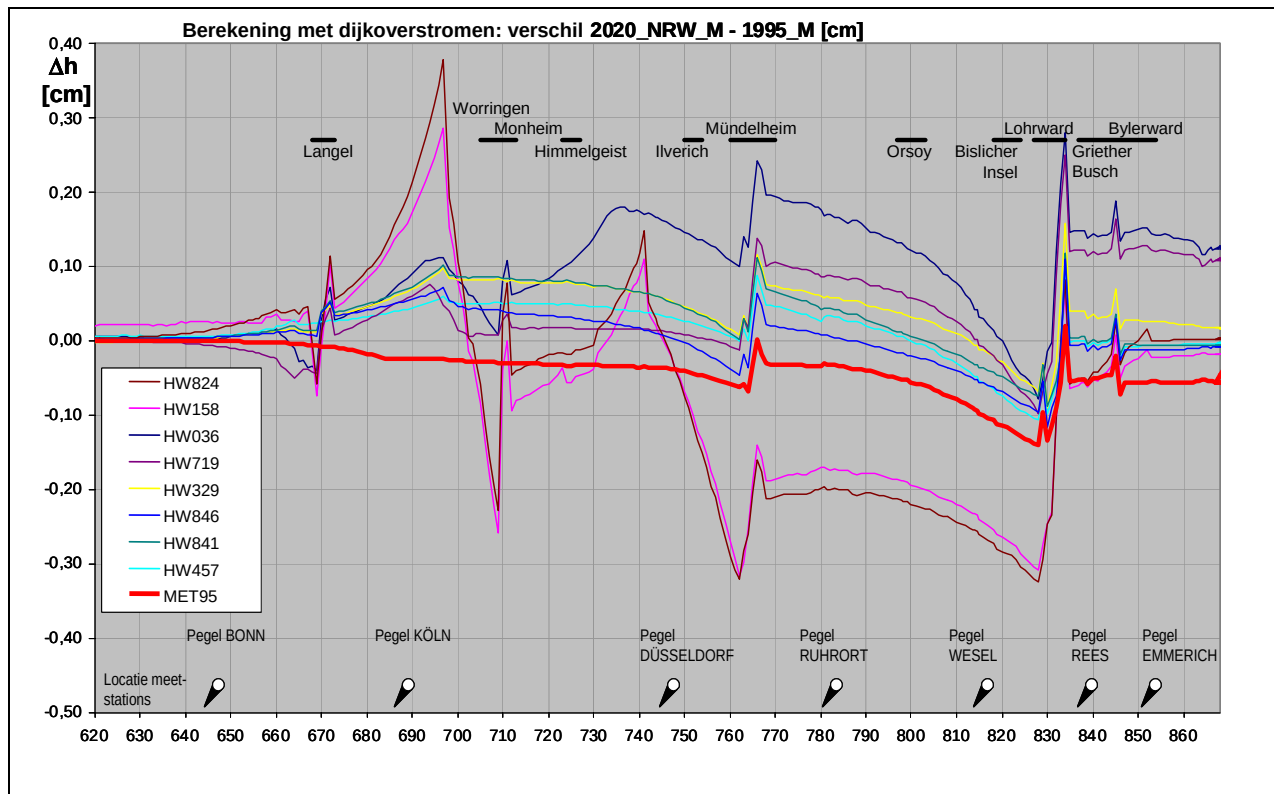
In dit verband moet de vraag worden gesteld, welke scenario's men met elkaar moet vergelijken om de effectiviteit van de maatregelen te kunnen aantonen. Men moet zich zelfs afvragen of überhaupt rekening moet of mag worden gehouden met het effect van een dijkoverstroming/dijkdoorbraak, of dat er (zoals in de studies die tot nu toe zijn uitgevoerd) berekeningen moeten worden gemaakt zonder dijkoverstromingen. Wat betreft de effectiviteit van afzonderlijke polders zou dit echter tot verkeerde interpretaties leiden. Zo is een in lokaal opzicht goed aangelegde retentiepolder (bijvoorbeeld om de afvoer respectievelijk de waterstand in een bepaald riviertraject zo lang mogelijk onder het niveau van de maatgevende afvoer te houden) bij een berekening zonder overstromingen stroomopwaarts in bepaalde omstandigheden schijnbaar te klein gedimensioneerd, omdat de polder bij het bereiken van de topwaterstand van een extreem hoogwater al vol is. In werkelijkheid wordt het hoogwater echter al door overstromingen die stroomopwaarts plaatsvinden afgetopt respectievelijk sterk verminderd en kan de retentiepolder zijn effect toch nog ontwikkelen.

Om het effect van waterstandreducerende maatregelen op stroomgebiedniveau te kunnen aantonen moet daarom (onder andere) eerst worden gedefinieerd:

- Wat zijn een „heel scala van frequente en zeldzame hoogwatersituaties“ en „een reeks standaard hoogwatersituaties“?
- Wat is de tijdhorizon voor de vergelijkingsbasis?
- Mag het effect van maatregelen worden beschreven zonder daarbij rekening te houden met dijkoverstromingen?

- Hoe moet er in principe worden omgegaan met eventuele overstromingen en hun effecten op de waterstand en de afvoer?

Het uiteenlopende beschermingsniveau langs de Rijn maakt het moeilijk om deze vragen te beantwoorden.



Figuur 6-10: Verandering van de topwaterstand in het lengteprofiel. Geplande toestand in NRW tegenover toestand 1995 (verschil scenario 2020_NRW_M – 1995_M). De in de legenda genoemde hoogwaters zijn naar hun omvang gerangschikt (volgens Mehlig, 2004).

6.5 Samenvatting en conclusies

Effect van overstromingen

- Het effect van overstromingen op de afvoeren en waterstanden langs de Nederrijn en de Nederlandse Rijntakken is groter dan dat van de hoogwaterreducerende maatregelen.
- Met de toenemende omvang van het hoogwater nemen de overstromingen van “hoogwaterbeschermd” gebieden toe. Dit leidt tot steeds grotere waterverliezen in de rivier en tot een reducering van de topafvoeren.
- Door de aanpassing van waterkeringen aan het vereiste beschermingsniveau, vooral in het gebied tot Düsseldorf/Krefeld, worden de topstanden van hogere extreme hoogwaters ($> HQ_{500}$) door overstromingen effectiever gereduceerd dan door de dijkversterkingen.

Effect van hoogwaterreducerende maatregelen op afvoeren en waterstanden

- Het effect van retentiepolders op de topafvoeren is sterk afhankelijk van het hoogwater. Daarom moet de doelstelling bij het inzetten van deze polders goed worden gedefinieerd en door bouwkundige maatregelen (de vorm van de in- en uitlaatconstructies, sturingssystemen) moet ervoor worden gezorgd dat dit doel ook echt kan worden bereikt.
- Dijkterugleggingen met verruiming van het stroomprofiel respectievelijk doorstroomde polders met een eigen aandeel in de afvoer hebben vooral een lokaal en een (in stroomopwaartse richting) waterstandreducerend effect. Direct benedenstrooms kan de waterstand zelfs in relatief kleine mate toenemen als de overgang naar de bestaande dijk een duidelijke versmalling van het profiel tot gevolg heeft. Bij de aanleg van dit soort maatregelen zou hiermee zeker rekening moeten worden gehouden.
- Het stelsel van hoogwaterreducerende maatregelen langs de Niederrhein laat in het huidige ontwerp het grootste effect zien bij hoogwaters met een omvang vergelijkbaar aan het hoogwater van 1995. Door een doelgerichte afstemming van de maatregelen (vooral van de retentiepolders) kan een beter effect op de hoogwaters in het bereik van de maatgevende afvoeren worden bereikt.
- De combinatie van het effect van de geplande maatregelen in Nederland en de maatregelen in NRW kan in het huidige ontwerp voor de grotere extreme hoogwaters een vermindering van de waterstand tot gevolg hebben van 30 cm bij de grens en 25 cm in het gebied Bislich/Lohrwardt. Bij een op de maatgevende afvoer afgestemde variant van de maatregelen in NRW en enkele extra maatregelen bij Orsoy en Bislich (NRWMAX-variant) zouden bij de grens en in het gebied Bislich/Lohrwardt zelfs waterstandreducties van 40 cm kunnen worden bereikt. Op andere plaatsen is de reducering van de waterstanden geringer.
- De elkaar versterkende effecten van maatregelen in het grensgebied zijn bijzonder belangrijk om het overstroomen van de keermuur bij Emmerich tegen te gaan bij hoogwaters die in het bereik van de maatgevende afvoer liggen. Omdat ook Nederlandse gebieden zouden worden getroffen als deze keermuur overstroomt, maakt dit voorbeeld duidelijk dat grensoverschrijdende inspanningen bij de hoogwaterbescherming voor beide landen nuttig is.
- Vanwege de grensoverschrijdende effecten van de waterstandreducerende maatregelen is een afstemming tussen de plannen van NRW en Nederland voor beide partijen nuttig. Daarom zou deze afstemming in toenemende mate de basis moeten vormen voor de gemeenschappelijke inspanningen op het gebied van de hoogwaterbescherming.

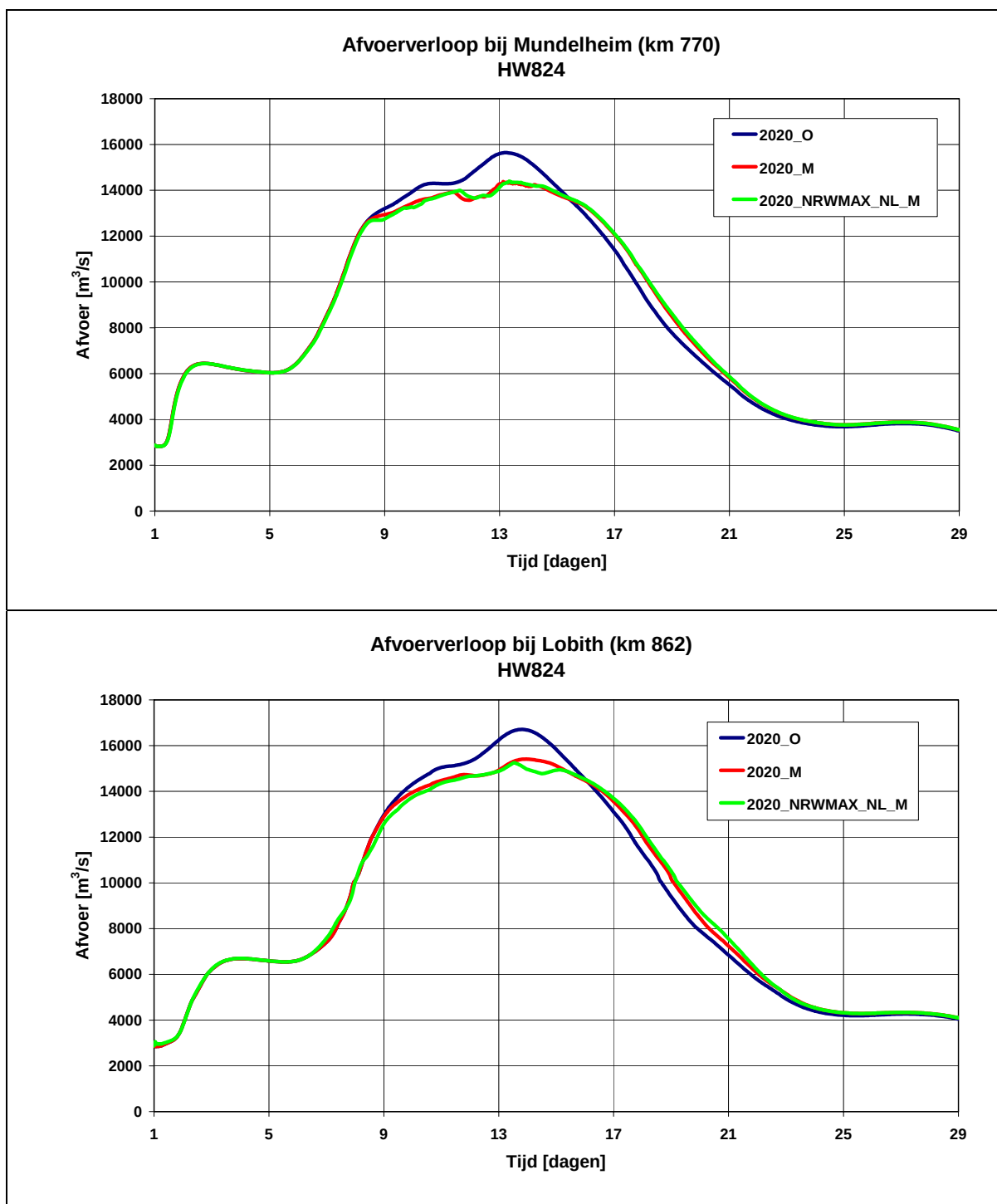
7 Afvoerverloop en duur van een hoogwater

Over het algemeen wordt ervan uitgegaan dat een hoogwatersituatie door doelgerichte retentiemaatregelen en (ongewilde) overstromingen langer duurt. Dit is bijzonder belangrijk in verband met de belasting van de dijken door hoge waterstanden.

Figuur 7-1 toont afvoergolven voor verschillende scenario's. De afvoergolven worden door de dijkoverstromingen duidelijk afgevlakt en tijdens de val van de hoogwatergolf verlengd. Afhankelijk van het afvoerniveau zal het hoogwater een halve tot maximaal een hele dag langer duren. Dit komt door het feit dat de overstromingen ervoor zorgen dat het onttrokken water met vertraging in de Rijn terugkeert. De figuren illustreren echter dat er meer volume in het bereik van de topstanden wordt onttrokken dan er in de val van de hoogwatergolf weer bijkomt. Dit kan worden verklaard door het feit dat een groot deel van het water niet meer naar de rivier terugstroomt, maar achter de dijken blijft. In werkelijkheid zou men dit water na afloop van het hoogwater door gerichte ingrepen in het systeem weer naar de Rijn moeten terugleiden. Omdat dit echter pas na afloop van het hoogwater zou gebeuren, hoeft er geen rekening te worden gehouden met een verdere verlenging van de afvoergolf.

De hoogwaterreducerende maatregelen hebben een vergelijkbare kleine invloed op de afvoergolven en spelen met betrekking tot de langere duur van het hoogwater geen rol.

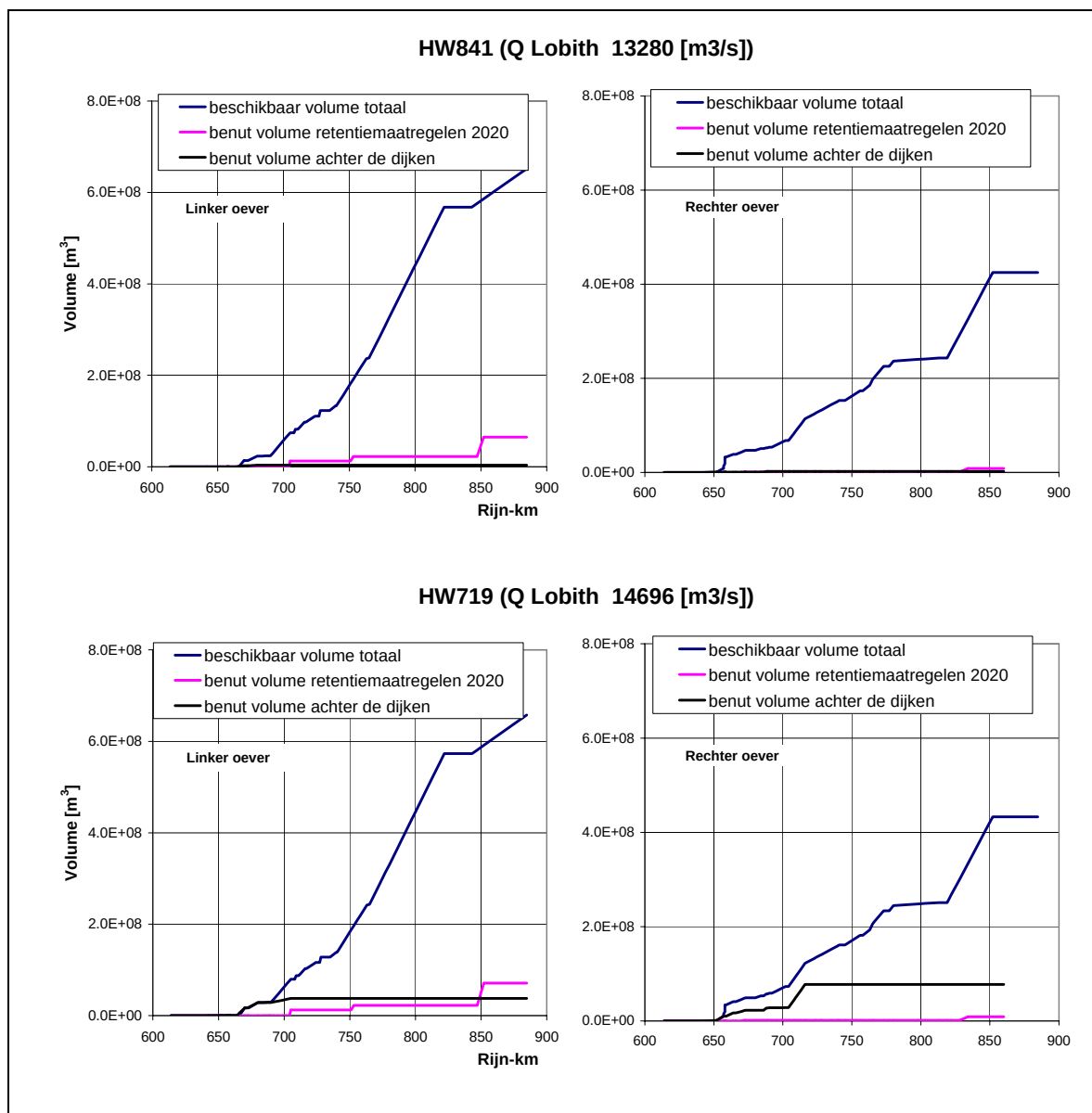
Over het algemeen is sprake van een beperkt langere duur van de hoogwatergolven. Het effect van de hoogwaterreducerende maatregelen en vooral de overstromingen is in dit opzicht dus gering.



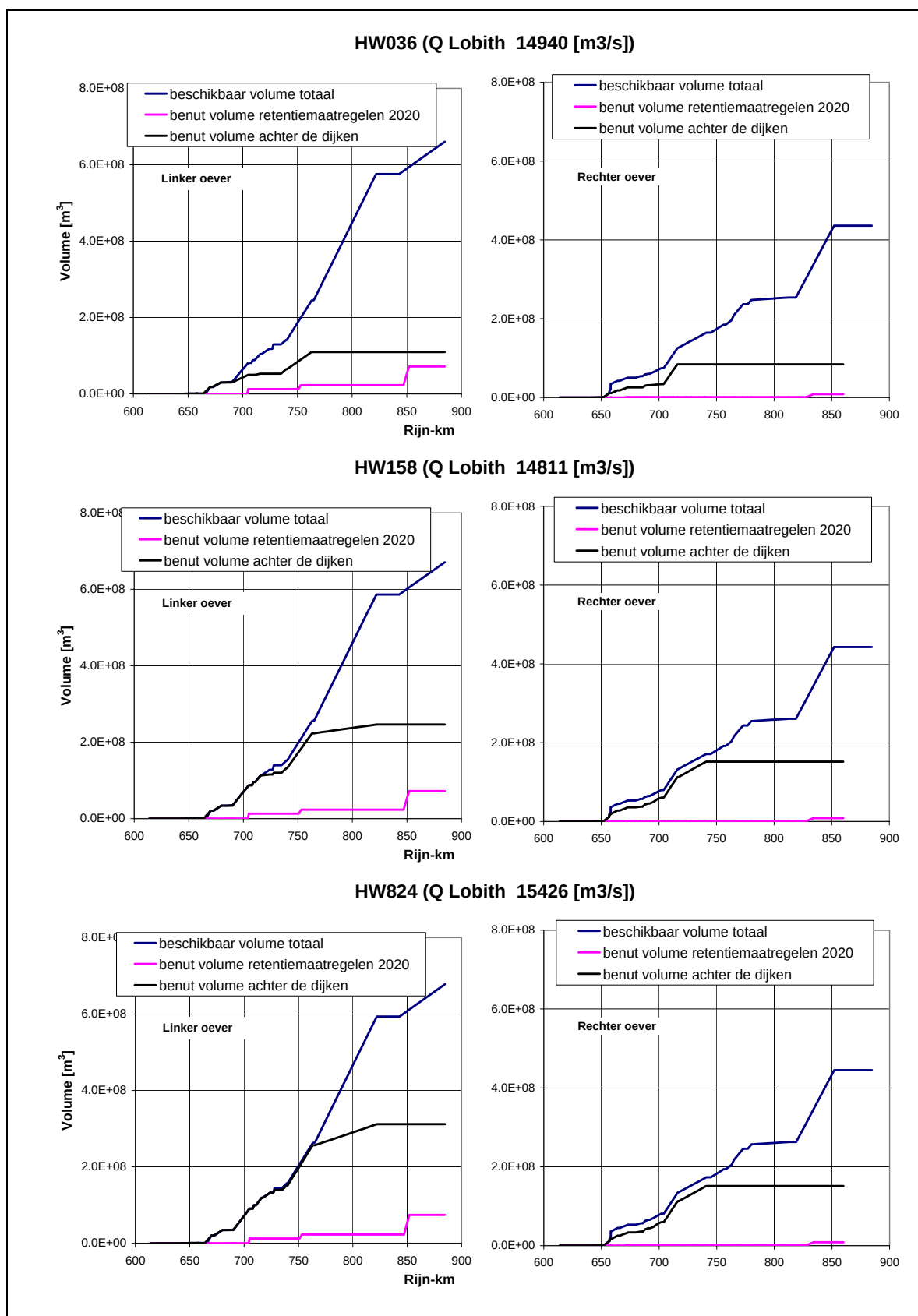
Figuur 7-1: Effect van de overstromingen en hoogwaterreducerende maatregelen op de afvoergolf (HW824).

8 Geborgen watervolumes

Figuur 8-1 geeft een indruk van de bergingsvolumes die in het studiegebied achter de dijken en in de retentiepolders ter beschikking staan, evenals van de bij de berekeningen voor de geplande toestand 2020 (scenario 2020_NRW_NL_M) meegerekende volumes. Ten aanzien van de hier weergegeven vijf grootste hoogwaters wordt zichtbaar dat bij stijgende afvoeren ook in toenemende mate water wordt teruggehouden.



Figuur 8-1: Achter de dijken en in de retentiepolders opgevangen waterhoeveelheden en het watervolume dat in zijn totaliteit ter beschikking staat. Scenario 2020-NRW_NL-M, bij de vijf hoogste hoogwaters HW841, HW719 HW036, HW158 en HW824 (zie ook Figuur 8-1 vervolg).



Figuur 8-1 (vervolg): Achter de dijken en in de retentiepolders opgevangen waterhoeveelheden en het watervolume dat in zijn totaliteit ter beschikking staat. Scenario 2020-NRW_NL-M bij de vijf hoogste hoogwaters HW841, HW719 HW036, HW158 en HW824.

Al bij het hoogwater HW719 is het retentievolume van de retentiepolders zowel op de linker als de rechter Rijnsoever geheel gevuld. Bij een stijgend hoogwater vult zich ook het volume achter de dijken, d.w.z. eerst in het zuidelijke gebied en later ook in het middengebied. Bij hoogwater HW824 is het bergingsvolume op de linker Rijnsoever tot ongeveer Rijn-km 770 volledig gevuld, op de rechter Rijnsoever blijft echter langs de gehele Niederrhein een restvolume over.

Over het algemeen is het volume van de retentiemaatregelen klein vergeleken bij het retentievolume achter de dijken. Dit maakt duidelijk dat het bijna niet mogelijk is om een achter de dijk liggend retentievolume, dat als overloopgebied aan de rivier werd onttrokken, met gerichte retentiemaatregelen te compenseren.

9 Wat gebeurt er als de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn nog extremer wordt?

9.1 Inleiding

Steeds weer wordt de vraag gesteld wat er zal gebeuren als de afvoeren in het stroomgebied hoger zouden worden. Zulke stijgingen van de afvoer zouden een gevolg kunnen zijn van klimaatveranderingen, maar zouden ook door andere veranderingen in het stroomgebied (bijvoorbeeld de verhoging van de dijken langs de Oberrhein) kunnen worden veroorzaakt.

Daarom zou allereerst duidelijk moeten worden wat de te verwachten effecten van een eventuele klimaatverandering voor de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn zullen zijn (hoofdstuk 9.2). Vanwege methodische redenen en tijdsgebrek kon op deze vraag slechts een kwalitatief antwoord worden gegeven. Afvoergolven voor het bepalen van de effecten van klimaatverandering op de afvoer en eventuele overstromingen langs de Niederrhein en de Nederlandse Rijntakken konden niet gemaakt worden.

Om toch een uitspraak te kunnen doen over de effecten die hogere afvoeren op het overstromingsproces langs de Niederrhein zullen hebben, worden de resultaten van de berekeningen voor het nog extremere hoogwater HW158 zonder overstromingen op de Oberrhein (HW158OhneDueb) nader geanalyseerd. De effecten op het overstromingsproces worden in hoofdstuk 9.3 behandeld. De effecten op de mogelijke topafvoeren worden in hoofdstuk 9.4 weergegeven.

9.2 Effect van een eventuele klimaatverandering op de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn

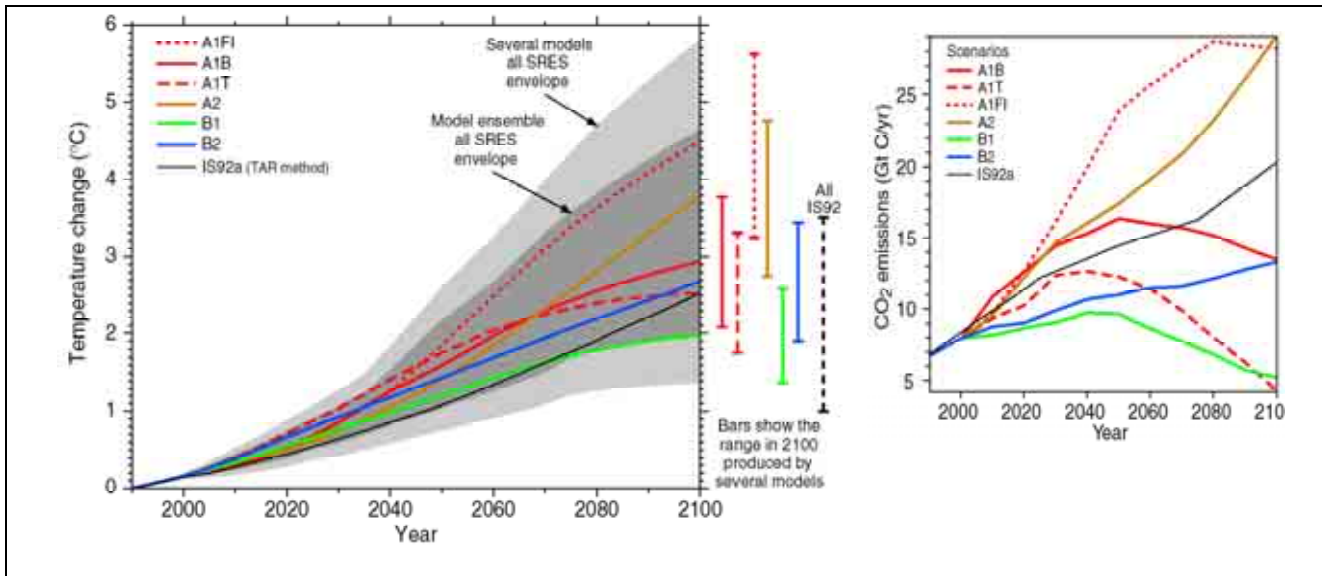
9.2.1 Mondiale klimaatverandering

De sinds geruime tijd waargenomen, wereldwijde opwarming van de lage luchtdruk toont aan dat wij ons in een fase van mondiale klimaatverandering bevinden. Uit statistische analyses van de temperatuurreeksen voor de laatste 120 jaar blijkt, dat het antropogene broeikaseffect mondiaal gezien waarschijnlijk tot een temperatuurstijging van 0,6°C tot 0,8°C heeft geleid (IPCC, 2001).

Uitgaande van de resultaten van verschillende GCM's (General Circulation Models) wordt in het derde "Assessment Report" van de internationale commissie voor de klimaatverandering (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) het volgende voorspeld (IPCC, 2001):

- Bij alle IPCC-scenario's wordt een stijging van de gemiddelde mondiale temperatuur en van de zeespiegel verwacht.
- In de 21e eeuw zijn hogere maximumtemperaturen en een groter aantal hete dagen over vrijwel het gehele landoppervlak waarschijnlijk, evenals een toenemende continentale droogte in de zomer. Daarmee gaat een hoog droogterisico gepaard voor de continentale gebieden in de middelste breedtezones. Bovendien moet rekening worden gehouden met periodes met een grotere neerslagintensiteit.

- Voor de periode na 2050 beginnen de GCM's verschillende klimaatontwikkelingen bij de verschillende scenario's te vertonen (Figuur 9-1). Dit wordt o.a. veroorzaakt door de verschillende aannames die aan de verschillende scenario's ten grondslag liggen m.b.t. de vraag hoe de mensheid met de mondiale veranderingen om zal gaan (verschillende scenario's m.b.t. CO₂-emissies etc.).



Figuur 9-1: Voorspelde trends ten aanzien van de luchttemperatuur gebaseerd op verschillende emissiescenario's (figuur rechts) en berekeningen met verschillende GCM's (IPCC, 2001).

9.2.2 Reeds waargenomen variabiliteit van hydrometeorologische en hydrologische grootheden in het stroomgebied van de Rijn

De discussie over mogelijke klimaatveranderingen vormde de aanleiding om te onderzoeken in hoeverre klimaatveranderingen zich op dit moment al in hydrometeorologische en hydrologische meetreeksen weerspiegelen. De bestaande inzichten op dit gebied werden tijdens een door de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR) georganiseerde workshop (Krahe, 2003) gebundeld. De resultaten voor het stroomgebied van de Rijn kunnen als volgt worden samengevat:

a) Waargenomen variabiliteit van hydrometeorologische grootheden

- Duidelijke toename van de neerslaghoeveelheden in het hydrologische winterhalfjaar.
- Toename van het aantal dagen met grote neerslag in het winterhalfjaar en in de natte perioden.
- Grotere toename van de extreme neerslagen dan van de gemiddelde waarden.
- Stijging van de minimumluchttemperaturen in de winter.
- Stijging van de gemiddelde jaartemperatuur en de gemiddelde maandtemperaturen, waarbij de maanden augustus en december vooral in het oog springen.
- Matige toename van het aantal neerslagvrije dagen in de zomer.

De voor de winter (december tot en met februari) respectievelijk voor het hydrologische winterhalfjaar vastgestelde temperatuurstijgingen hebben

gevolgen voor de ontwikkeling van het sneeuwdek en dus ook voor de afvoer in het winterhalfjaar.

b) Afvoer

- Veranderingen in het afvoergedrag van de rivieren met een natuurlijk afvoerregime in de laatste decennia. Vooral voor het hydrologische winterhalfjaar kan een toename van de afvoeren worden vastgesteld.
- Vooral de veranderingen van de neerslaghoeveelheden in de stroomgebieden zonder significant retentieaandeel zijn verantwoordelijk voor de vastgestelde veranderingen in het afvoerregime.
- In de stroomgebieden van de Alpen en het middelgebergte reageert de afvoer zeer sterk op de temperatuur- en neerslagveranderingen.

9.2.3 Effect mondiale klimaatverandering op het stroomgebied van de Rijn

Regionale klimaatscenario's

Regionale klimaatscenario's worden afgeleid uit de resultaten van de GCM's. Hiervoor worden verschillende statistische methoden gebruikt of regionale meteorologische modellen met een hoge ruimtelijke resolutie, die gebruik maken van de resultaten van de GCM's als randvoorwaarde.

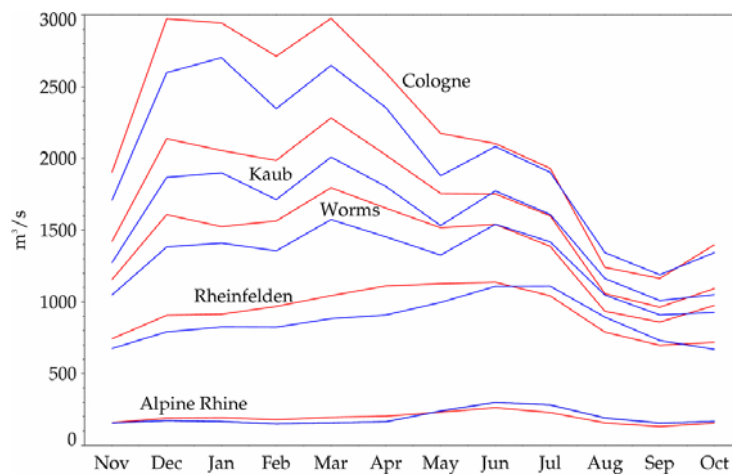
De belangrijkste resultaten van de scenarioberekeningen zijn:

- In de winter: een toename van de neerslag in Noord- en Centraal-Europa.
- In de zomer: een toename van de perioden met grote neerslag. Met betrekking tot de gemiddelde neerslag bestaan echter verschillende resultaten. Vanwege de hogere gemiddelde temperaturen moet met een hogere verdamping en een groter droogterisico rekening worden gehouden.

Afvoerscenario's

Voor het opstellen van de afvoerscenario's worden als invoer voor de hydrologische modellen gesimuleerde neerslaggegevens gebruikt die op een klimaatverandering zijn gebaseerd. Bij toepassing van de resultaten uit regionale klimaatmodellen zijn op dit moment vaak nog correcties nodig als de regionale meteorologische omstandigheden niet voldoende nauwkeurig gemodelleerd kunnen worden. Ook bij de hydrologische modellen moet men, vooral als het om de modellering van extreme gebeurtenissen gaat, met grote onzekerheden werken. Beter onderbouwd zijn onderzoeken naar de verandering van de gemiddelde afvoer of het afvoerregime, bijvoorbeeld op basis van maandgemiddelde afvoeren (Kwadijk, 1993; Kleinn, 2002).

Kleinn (2002) voerde met een qua tijd en ruimte zeer gedetailleerd klimaatmodel en een daarop aansluitend hydrologisch model een gevoeligheidsanalyse uit. Hierbij werd uitgegaan van een temperatuurstijging van 2°C voor de invoer van de regionale klimaatmodellen CHRM56 en CHRM14. Figuur 9-2 illustreert de verschuiving die daardoor ontstaat in het afvoerregime van de Rijn gedurende een simulatieperiode van vijf jaar. De opgetreden veranderingen worden voor het grootste deel veroorzaakt door de veranderde omstandigheden in het winterhalfjaar, met neerslaghoeveelheden die als geheel hoger zijn. Ook de geringere vastlegging van de neerslag in de sneeuwlaag als gevolg van de temperatuurstijging speelt een rol.



Figuur 9-2: Verandering van het afvoerregime langs de Rijn bij een temperatuurstijging van 2°C. De werkelijke toestand is met blauw aangegeven, het scenario met rood (Kleinn, 2002).

Een bijzonder probleem vormt de vraag in hoeverre de klimaatveranderingen de extreme hydrologische situaties, en hier vooral hoogwater, beïnvloeden. Het antwoord hierop kan op dit moment nog niet worden gegeven. Als eerste stap ter beantwoording van deze vraag werd door de BfG in het kader van het project „Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein“ allereerst de gebiedsneerslag bestudeerd die voor het meetstation Andernach met het klimaatmodel REMO van het Max-Planck-instituut voor Meteorologie in Hamburg was berekend (Eberle et al., 2004). Hierbij werden zowel voor het huidige klimaat alsmede een toekomstig klimaatscenario de neerslaghoeveelheden met verschillende tijdsduur geanalyseerd alsook de bijbehorende index voor de regenhistorie API, beiden met een duur van 30 jaar. De frequentieanalyse van de resultaten uit de modellen laat duidelijk zien dat men rekening moet houden met een toenemende frequentie van langdurige, neerslagrijke periodes.

Hierdoor valt te verwachten dat er ook vaker hoogwatersituaties zullen ontstaan. Deze gedachte wordt ondersteund door de regressieanalyses van de BfG. Daarbij werd voor de gegenereerde extreme situaties (zie hoofdstuk 4) de relatie onderzocht tussen de parameters van de neerslaggegevens in het gebied en de hoogte van de topafvoeren (Eberle et al. 2004). Er wordt een duidelijke relatie zichtbaar tussen de hoogten van de gebiedsneerslag voor verschillende tijdsduurklassen en de hoogwatertoppen bij het meetstation Andernach en ook tussen de historische regenindex voor de gebiedsneerslag en de hoogwatertoppen bij Andernach.

Een uitspraak ten aanzien van de topafvoeren als gevolg van een klimaatverandering is op grond van de met het model REMO gegenereerde reeks van 30 jaar voor neerslag onder veranderde klimaatomstandigheden niet direct mogelijk. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zou het genereren van extreme situaties op zijn minst ook op basis van het klimaatscenario moeten gebeuren, dus eerst de extrapolatie naar 1000 jaar met behulp van de neerslaggenerator, vervolgens de neerslag-afvoermodellering en tot slot het modelleren van het afvoerproces waarbij rekening wordt gehouden met dijkoverstromingen.

De resultaten met betrekking tot de effecten klimaatveranderingen op de afvoer in de Rijn kunnen als volgt worden samengevat:

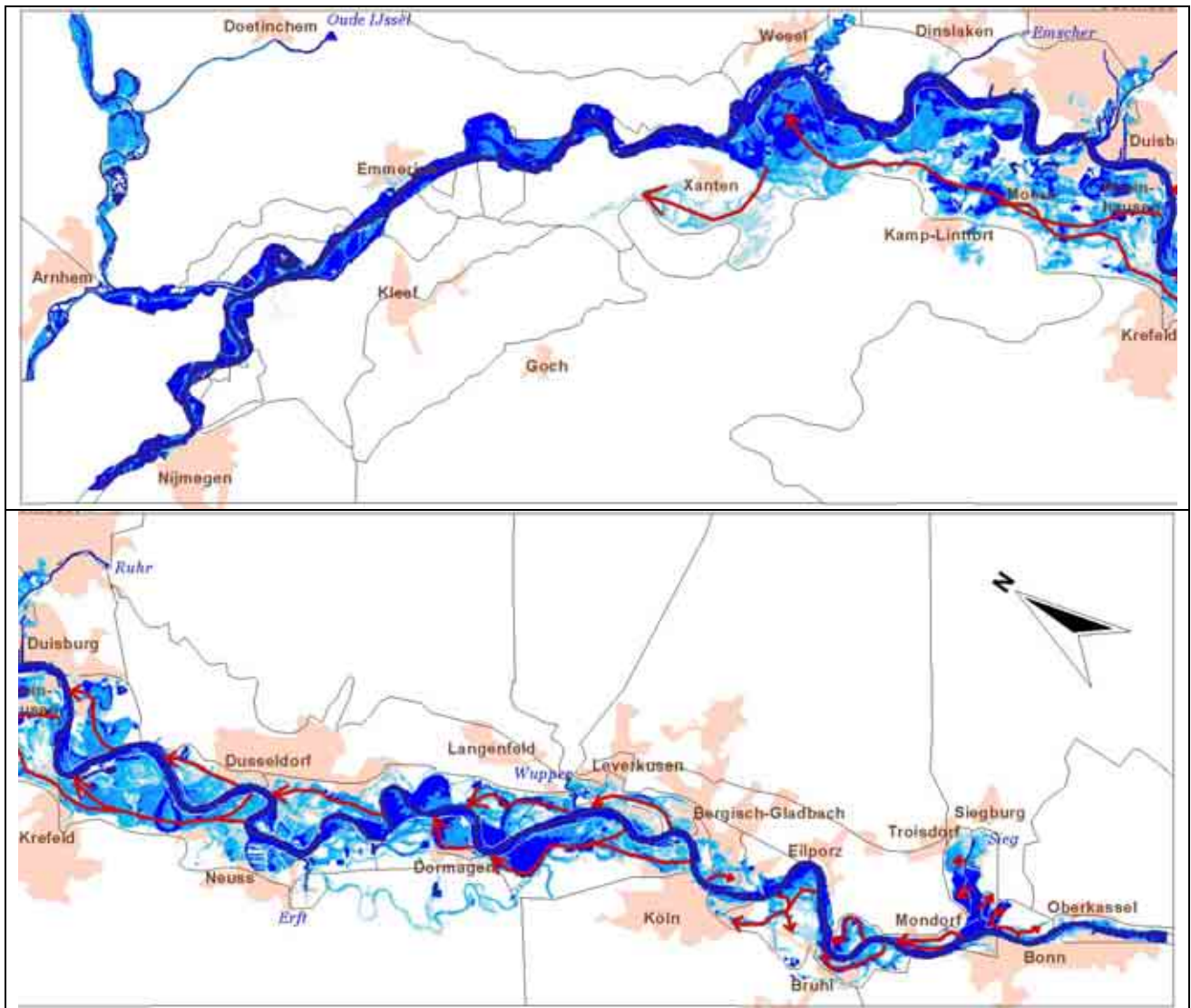
- Ten gevolge van klimaatverandering is in het winterhalfjaar een toename van de afvoeren te verwachten.
- Voor het zomerhalfjaar zijn de resultaten minder eenduidig. Een afname van de afvoeren lijkt niet onwaarschijnlijk omdat veel scenario's uitgaan van verminderde neerslagen en hogere temperaturen die de verdamping versterken.
- Vooral voor extreme situaties zijn de onzekerheden bij de schatting van afvoerveranderingen als gevolg van klimaatverandering bijzonder groot. Duidelijk is echter dat rekening moet worden gehouden met een toenemende frequentie van langdurige, neerslagrijke perioden. Dit ondersteunt de these dat ook moet worden uitgegaan van een toenemende frequentie van extreme hoogwatersituaties. Of hierdoor ten aanzien van de afvoer ook een hogere topwaarde voor Andernach ontstaat dan nu het geval is, moet nog nader worden onderzocht.

9.3 Overstromingen op de Niederrhein bij nog extremere afvoeren

Vanwege methodische redenen kon er slechts een kwalitatief antwoord worden gegeven op de vraag naar de effecten die eventuele klimaatveranderingen op de afvoeren in het stroomgebied van de Rijn zullen hebben (hoofdstuk 9.2). Om toch een uitspraak te kunnen doen over de effecten die nog hogere afvoeren voor het overstromingsproces op de Niederrhein zullen hebben, werden de berekeningsresultaten van de voor het extreme hoogwater HW158 zonder overstromingen op de Oberrhein (HW158OhneDueb) nader geanalyseerd. Bijlage 4-7 illustreert de maximale waterdiepten voor deze extreme situatie. Vergeleken met de meer realistische scenario's met overstromingen op de Oberrhein (HW158mitDueb en HW824mitDueb) worden over de gehele lengte van de Niederrhein duidelijk meer gebieden getroffen (vergelijk Bijlage 4-7 met Bijlage 4-3). In toestand 1995_DB wordt dit tot in het gebied Düsseldorf/Krefeld zichtbaar als een duidelijk bredere band van overstroomde gebieden aan beide zijden van de Rijn. Vanaf Krefeld wordt bij het extreme hoogwater HW158ohneDueb op de linker Rijnsoever het gehele, door mijnzakkingen getroffen gebied bij Moers/Kamp-Lintfort tot Xanten door overstromingen geteisterd. Het water stroomt parallel aan de Rijn zelfs langs Xanten tot in het gebied bij Kleve en alleen de oude slaperdijk bij Kleve-Kellen voorkomt dat het water verder naar Nederland stroomt. De banddijk voorkomt uiteindelijk dat het water in de Rijn terugstroomt. Een kleine waterstroom beweegt zich ook in de richting van de Niers, maar kan in het berekende scenario niet over de waterscheiding naar het stroomgebied van de Maas overlopen. Ook de grensoverschrijdende overstromingen als gevolg van een overstroming van de keermuur bij Emmerich nemen bij het hoogwater HW158ohneDueb een grotere vorm aan en leiden tot grotere waterdiepten.

In toestand 2020_DB komen de overstromingen slechts tot Xanten. Daarna stroomt het water niet meer verder naar het gebied bij Kleve. Ook het afstromen in de richting van de Niers is minder sterk. Dit wordt veroorzaakt door de dijkverhogingen in de buurt van de dijkdoorbraaklocaties stroomopwaarts en ter plaatse van Krefeld. De dijk breekt later dan in toestand 1995_DB, er stroomt minder water naar binnen en het water kan niet zoals in de toestand 1995_DB verder voorbij aan Xanten naar het gebied bij Kleve stromen. In toestand 2020_DB treden bij HW158ohneDueb in Emmerich zeer beperkte overstromingen op. Hier stroomt het water maar net over de keermuur.

Figuur 9-3 geeft een kwalitatief overzicht van de stroomwegen achter de waterkeringen.



Figuur 9-3: Stroomwegen achter de waterkeringen. Scenario 2020_DB HW158ohneDueb, kwalitatieve gegevens.

9.4 Topafvoeren bij nog extremere afvoeren

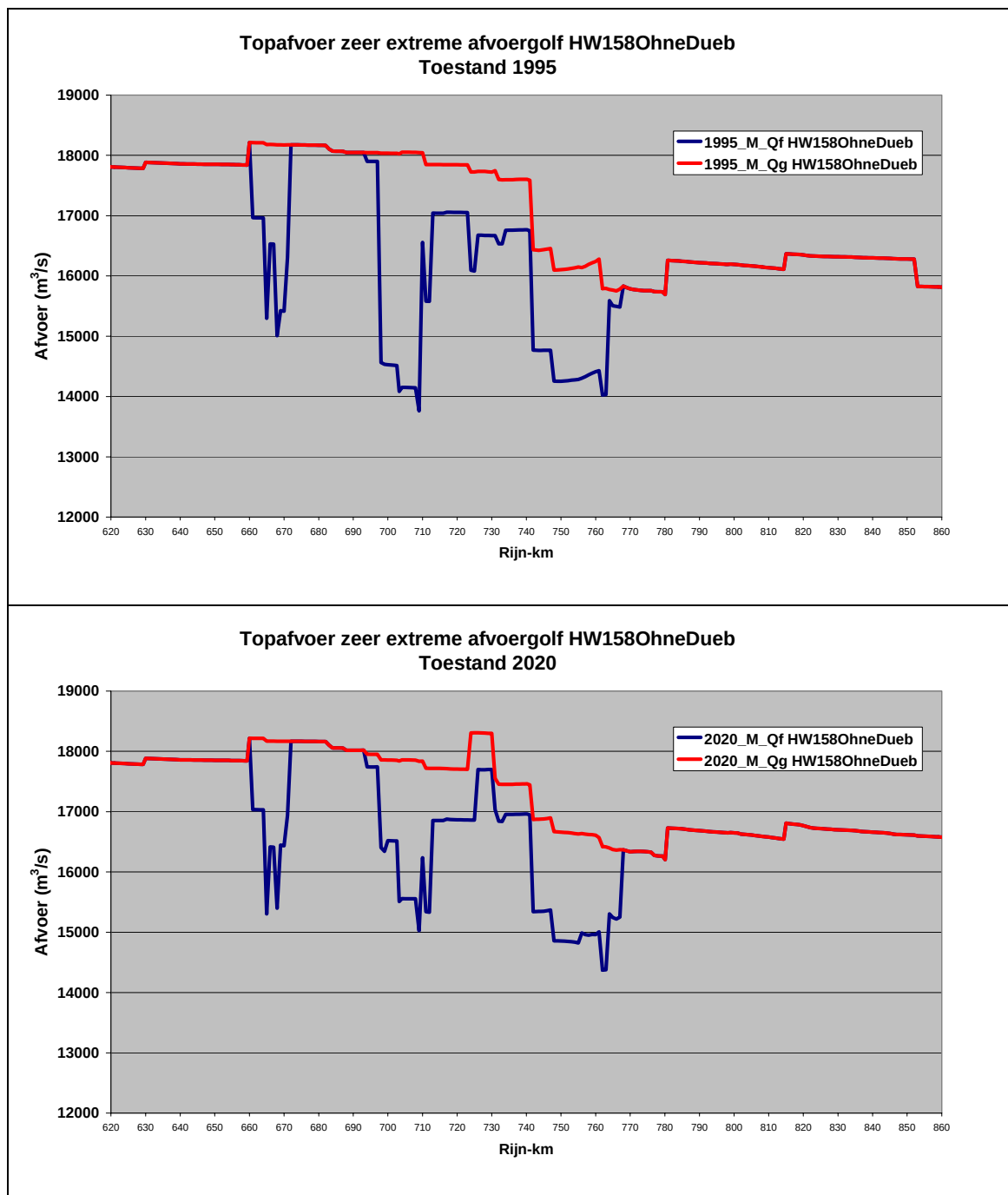
Door de berekeningen met het hoogwater HW158ohneDueb zijn zowel voor het 1D-model (SOBEK/DSS) als voor de 2D-berekeningen (Delft-FLS) gegevens m.b.t. topafvoeren bij nog extremere afvoeren beschikbaar.

Figuur 9-4 geeft de door SOBEK berekende topafvoeren in de Rijn (afvoer in de hoofdrivier (tussen de dijken), alsmede de totale afvoer (bestaande uit de afvoer in de hoofdrivier, tussen de dijken, en de afvoer achter de dijken). Ten opzichte van de hoogwaters met dijkoverstromingen op de Oberrhein is de omvang toegenomen van de parallelle afvoeren naast de Rijn die weer in de Rijn terugstromen. Ook is het daardoor getroffen riviertraject duidelijk groter geworden. Ondanks de toevoeren uit de zijrivieren is de topafvoer als gevolg van overstromingen vanaf Andernach tot Lobith in totaliteit verminderd. In de toestand 1995 bedraagt de topafvoer bij Rees ongeveer 16300 m³/s. Door de overstromingen bij Emmerich loopt dit terug naar 15800 m³/s. In de toestand 2020 is de topafvoer bij Rees 16600 m³/s en wordt deze tot aan Lobith niet verder gedempt.

In Tabel 9-1 staan nog meer topafvoeren. Daar worden ook de overeenkomstige resultaten van Delft-FLS weergegeven. Deze liggen in dezelfde orde van grootte.

Tabel 9-1: Topwaarden van nog extremere afvoeren bij de meetstations langs de Niederrhein.

Station	SOBEK		Delft-FLS	
	Qf (Qg indien anders dan Qf)		Q (komt overeen met Qf in SOBEK)	
	1995_M	2020_M	1995_DB	2020_DB
Andernach	17822	17822		
Bonn	17848	17848		
Köln	18049	18019	18146	18117
Düsseldorf	14765 (16431)	15347 (16876)	15331	15286
Ruhrort	16258	16729	16171	16215
Wesel	16113	16547	16387	16371
Rees	16304	16671		
Emmerich	16291	16641		
Lobith	15812	16571	15787	16318



Figuur 9-4: Ontwikkeling van de topafvoer langs de Rijn. Nog extremer hoogwater HW158ohneDueb.

10 Afvoercapaciteit en kritieke afvoer

Op basis van de maatgevende afvoer en de extra afvoeren bij benutting van de waakhoogte werd in hoofdstuk 2.3 een schatting gegeven van de afvoercapaciteit van de Rijn in het studiegebied, zowel voor de huidige als voor de toekomstige hoogte van de waterkeringen (Tabel 2-4 en Tabel 2-5).

De resultaten van de in deze studie uitgevoerde berekeningen maken het niet mogelijk om een afvoercapaciteit voor het gehele riviertraject te geven. De reden hiervoor is dat de afvoertop bij het overstromen van een waterkering zodanig kan verminderen, dat de afvoercapaciteit meer benedenstrooms niet meer kan worden bereikt. Met behulp van de berekeningen kan echter per punt worden aangegeven bij welke afvoeren een overstroming van de waterkeringen ontstaat. Hieronder wordt daarom indicatief bekeken in hoeverre deze (hierna te noemen) „kritieke afvoeren“ afwijken van de in hoofdstuk 2.3 geraamde afvoercapaciteiten.

Figuur 10-1 geeft bij de verschillende scenario's de door de modellen Delft-FLS en SOBEK/DSS berekende kritieke afvoeren weer, evenals de afvoercapaciteiten die op basis van de maatgevende afvoeren werden geraamd (toestand 2020). Er is een puntenwolk te zien die zowel voor 1995 als voor 2020 vooral in het gebied tot Rijn-km 710 duidelijk afwijkt van de geschatte afvoercapaciteit. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat het hier voor een deel gaat om overstromingen van hoger gelegen gebieden en van waterkeringen (meestal muren en mobiele waterkeringen) met een waakhoogte van 10 tot 20 cm. Omdat er bij de schattingen in hoofdstuk 2.3 van wordt uitgegaan dat bij muren een waakhoogte van 50 cm wordt aangehouden, is deze vaak te hoog geschat.

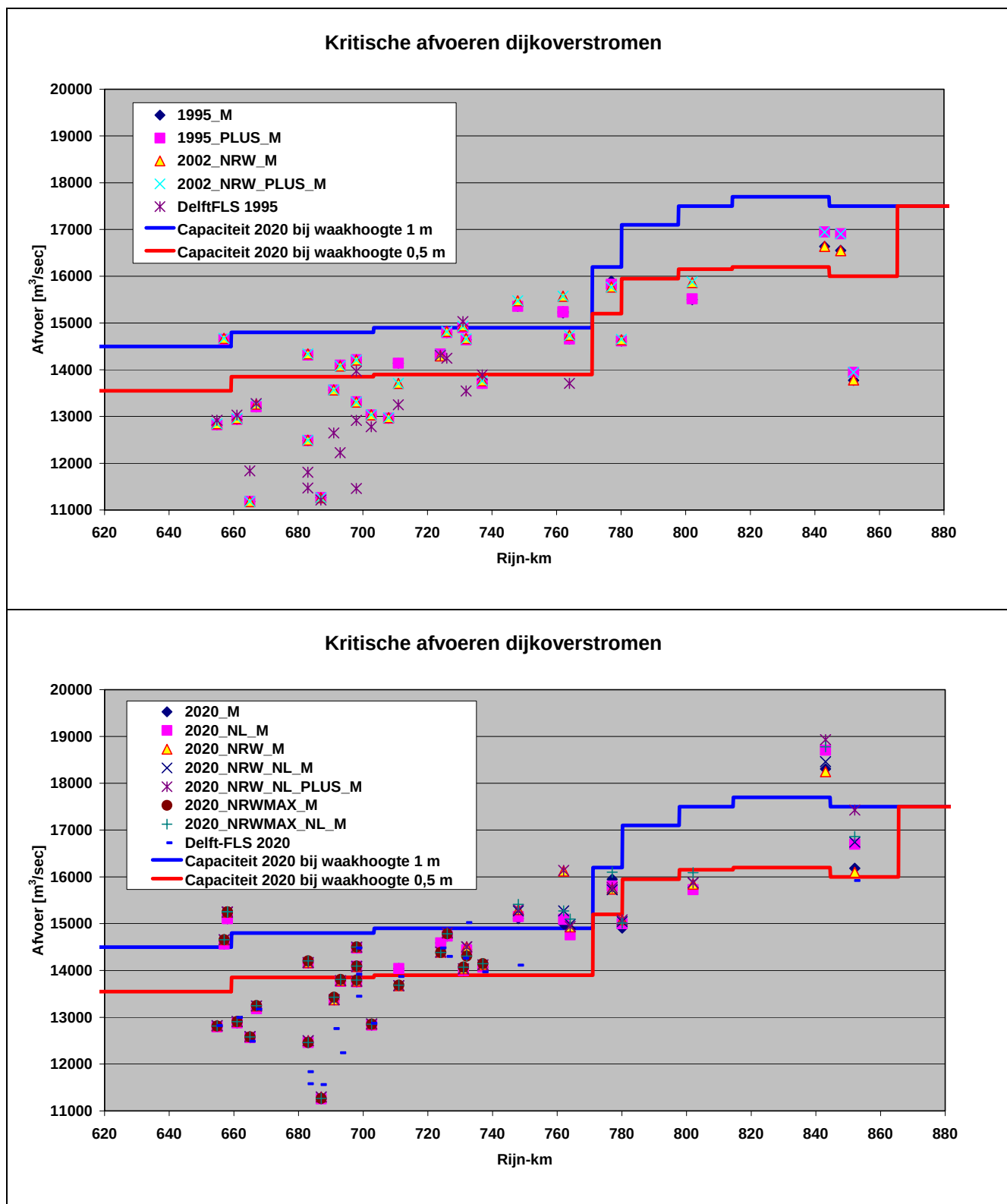
In het volgende riviertraject (ongeveer tussen Rijn-km 720 tot 770) liggen de kritieke afvoeren tussen de geraamde afvoercapaciteiten waarbij een waakhoogte van 0,5 m respectievelijk 1 m wordt aangehouden. Bekijkt men de dijkhoogten die in Bijlage 1-3 voor dit traject worden aangegeven, dan wordt duidelijk dat de hoogte van de waterkeringen (minus waakhoogte) in dit gebied in de huidige toestand langs grote delen van dit traject beneden het nagestreefde beschermingsniveau van HQ_{200} ligt. In de toekomst (situatie in 2020) zal een groot deel van de waterkeringen op het nagestreefde beschermingsniveau worden gebracht. In de kritieke afvoeren van Figuur 10-1 wordt dit voor een deel weerspiegeld door het feit dat deze in 2020 hoger zijn dan in 1995/2002.

De twee kritieke afvoeren die voor het gebied Rijn-km 770 tot 780 zijn weergegeven, ontstaan op doorbraaklocaties in het gebied van de monding van de Ruhr. De kritieke afvoer bij Rijn-km 802 betreft gebieden met hoge oevers (Bijlage 1-1).

Tot slot ontstonden er in het laatste traject bij de berekeningen met het extreme hoogwater HW158mitDueb voor de toestand 1995 bij Rijn-km 840 tot 850 op de linkeroever van de rivier twee kleinere dijkoverstromingen. Na uitvoering van de dijkversterkingen tot 2020 zijn de kritieke afvoeren echter zo hoog dat overstromingen niet meer worden berekend. Tot slot wordt duidelijk dat ook de kritieke afvoer bij Emmerich door de aanleg van de keermuur in toestand 2020 op het gewenste hogere niveau komt te liggen.

Als men de lokaal optredende kritieke afvoeren van de verschillende scenario's met elkaar vergelijkt, blijkt dat de hoogwaterreducerende maatregelen voor een deel ook de kritieke afvoeren beïnvloeden. Dit is het duidelijkst voor het

referentiejaar 2020 bij Emmerich. In Nederland zijn de kritieke afvoeren voor alle scenario's met maatregelen duidelijk hoger dan de overeenkomstige scenario's zonder maatregelen.



Figuur 10-1: Kritieke afvoeren en de op basis van de maatgevende afvoer geraamde afvoercapaciteit (toestand 2020).

11 Nauwkeurigheid van de resultaten

11.1 Opmerking vooraf

De resultaten van het hier gepresenteerde onderzoek zijn gebaseerd op berekeningen met na elkaar geschakelde en aan elkaar gekoppelde statistische en numerieke modellen:

- Neerslaggenerator
- Neerslag-afvoermodel HBV
- Waterbewegingsmodel SYNHP tot Maxau
- Waterbewegingsmodel SOBEK tot Andernach (Lobith)
- Overstromingsmodel Delft-FLS
- Waterbewegingsmodel SOBEK/DSS

De resultaten van ieder model hebben een nauwkeurigheid die door de gekozen parameters in het model en de randvoorwaarden wordt bepaald. Hieronder zal op enkele aspecten nader worden ingegaan om in te kunnen schatten met welke breedte van nauwkeurigheid de resultaten moeten worden bekeken.

Allereerst de resultaten bij Andernach (hoofdstuk 11.2). Hierbij moet in eerste instantie rekening worden gehouden met het feit dat er voor de berekening van de afvoer bij Andernach een modelketen van vier afzonderlijke modellen is ingezet: een neerslaggenerator, een neerslag-afvoermodel en twee verschillende waterbewegingsmodellen. Bovendien werd gerekend met een vereenvoudigde methode voor het bepalen van overstromingen langs de Oberrhein als gevolg van dijkoverstromingen.

Daarna wordt in hoofdstuk 11.3 tot en met 11.7 de invloed van de voor de modellen gekozen randvoorwaarden (afvoer bij Andernach, toevoer uit de zijrivieren, invloed van het grondwater, stijging van de zeespiegel, morfologische ontwikkeling van de rivierbedding) besproken en geraamd. Voor de invloed van de modelparameters op de resultaten van de 1D-berekeningen wordt verwezen naar Van der Veen et al. (2004b).

Ook de keuze of er bij een overstroming wel of niet een dijkdoorbraak zal ontstaan, is van invloed op de resultaten. Dit onderwerp wordt behandeld in hoofdstuk 11.8.

Tot slot worden voor bepaalde punten langs de Nederrijn de door het 2D-model Delft-FLS berekende topafvoeren tussen de dijken vergeleken met de topafvoeren uit het 1D-model SOBEK (hoofdstuk 11.9).

Hoofdstuk 11.10 vat de belangrijkste punten uit hoofdstuk 11 samen.

11.2 Nauwkeurigheid van de berekende afvoeren bij Andernach

11.2.1 Het gebruik van verschillende modellen

Voor de berekening van de extreme afvoeren bij Andernach door de BfG werden vier modellen ingezet: een neerslaggenerator, een neerslag-afvoermodel en twee waterbewegingsmodellen. De eerste resultaten voor Andernach komen in eerste instantie voort uit de koppeling van de neerslaggenerator en het neerslag-afvoermodel dat hierna „hydrologische

modellering HBV“ wordt genoemd. Bij deze berekeningen wordt geen rekening gehouden met het effect van de retentiemaatregelen en dijkoverstromingen op de Oberrhein, zodat in een tweede stap het neerslag-afvoermodel aan de twee waterbewegingsmodellen SYNHP en SOBEK werd gekoppeld. Dit wordt hierna „hydrologisch/hydraulische modellering“ genoemd. Zoals Tabel 11-1 laat zien, vertoont de modelkoppeling van de BfG bij de hydrologisch/hydraulische modellering 4 tot 14% hogere topafvoeren dan bij uitsluitend de hydrologische modellering. Uit onderzoek van de BfG bleek op grond van historische afvoergolven, dat de hydrologisch/hydraulische modelkoppeling trendmatig tot hogere afvoeren leidt dan op grond van de neerslagvelden mag worden verwacht (Eberle et al., 2004). Voor het fundamentele onderzoek naar de vraag wat er gebeurt als er op de Niederrhein extreme afvoeren optreden, is dit verschil acceptabel. De herhalingsfrequentie van de onderzochte hoogwaters kan echter niet zonder meer worden bepaald.

Over het algemeen moet rekening worden gehouden met een te hoge schatting van de afvoeren bij Andernach.

Tabel 11-1: Verschillende resultaten door verschillende modellen. Alle berekeningen zonder dijkoverstroming op de Oberrhein en de Niederrhein.

Model- hoogwater	Hydrologische en hydrologisch-hydraulisch model BfG		
	Topafvoer hydrologisch modellering HBV (BfG) [m ³ /s]	Topafvoer hydrologisch / hydraulische modellering (BfG) [m ³ /s]	Topafvoer verschil [%]
	Andernach	Andernach	Andernach
HW036	15087	15956	5,8
HW158	16894	17822	5,5
HW329	11590	12362	6,7
HW457	12461	14157	13,6
HW719	15354	16135	5,1
HW824	15071	15757	4,5
HW841	12691	13677	7,8
HW846	13173	14176	7,6

11.2.2 Vereenvoudigde aanpak voor de berekening van overstromingen op de Oberrhein

In tegenstelling tot de berekeningen voor de Niederrhein werden de eventuele overstromingen voor de Oberrhein sterk vereenvoudigd voorgesteld. Zo wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met fenomenen als een dijkdoorbraak door het overstromen van een dijk en een parallelle afvoerstroam achter de dijk. Niet bepaald kan worden of dit tot een te hoge of te lage schatting van de afvoer bij Andernach leidt (zie hiervoor ook hoofdstuk 5 en 11.8). Bovendien werd ervan uitgegaan dat de extra afvoer, die door het benutten van de waakhogte kan worden afgevoerd, langs de gehele Ober- en Mittelrhein 300 m³/s uitmaakt (zie hoofdstuk 2.3.1, Eberle et al., 2004). Gelet op de lokale afvoerkrommen zou de extra afvoerhoeveelheid volgens Dijkman et al. (2003) op veel plaatsen wel eens 1000 m³/s per 1 m waakhogte kunnen zijn, zodat 300 m³/s als een ondergrens moet worden gezien. Wat het effect zal zijn van een verhoogde afvoercapaciteit kan moeilijk worden gezegd, omdat deze ertoe kan leiden dat er meer water naar Andernach stroomt. Maar het kan ook betekenen dat de topafvoeren effectiever worden afgetopt en de topafvoeren bij Andernach dus ook lager worden. Deze effecten worden in hoofdstuk 5 en 11.8 beschreven.

11.3 Effect veranderde afvoer bij Andernach op de verdere resultaten voor de Niederrhein en de Rijntakken

Om het effect te kunnen beoordelen van een verandering van de afvoer bij Andernach op de afvoeren langs de Niederrhein, werden met SOBEK voor toestand 1995_O berekeningen uitgevoerd, waarbij de negen afvoeren van de extreme hoogwaters (toestand OR-2002 met dijkoverstromingen op de Oberrhein) met 5% werden verlaagd, met 5% werden verhoogd, met 100% werden verkort respectievelijk met 100% werden verlengd (d.w.z. dat alle hoogwaters in de helft van de tijd respectievelijk in een twee keer zo lange tijd verliepen en dat deze daardoor ook steiler of vlakker werden).

In zijn geheel is de afvoer bij Andernach zeer belangrijk voor de beoordeling van extreme afvoeren op de Niederrhein. Vijf procent meer of minder afvoer bij Andernach leidt tot 500 tot 750 m³/s meer of minder afvoer op de Niederrhein. Steile afvoergolven worden daarbij sterker afgevlakt dan vlakke. Meer details zijn te vinden in Van der Veen et al. (2004b).

11.4 Effect veranderde afvoeren uit de zijrivieren

Zoals voor de afvoer bij Andernach werd met SOBEK ook nader onderzoek verricht m.b.t. toestand 1995_O, waarbij de afvoeren van de zijrivieren alleen in Duitsland, alleen in Nederland respectievelijk in Duitsland én Nederland samen werden veranderd (Van der Veen et al., 2004b). Hierbij werden de afvoeren van de zijrivieren met 10% verminderd of met 10% verhoogd. Ook werden de tijden van de oorspronkelijke afvoergolven verschoven naar 24 uur eerder, respectievelijk 24 uur later. De topafvoeren van de zijrivieren werden hierdoor dus een dag eerder of een dag later bereikt.

De effecten van een verandering van de afvoeren van de Nederlandse zijrivieren van de Rijn zijn verwaarloosbaar klein, terwijl de effecten van een verandering van de afvoeren uit de Duitse zijrivieren duidelijk groter zijn en grofweg een derde van de effecten veroorzaken die door de afvoerhoging respectievelijk -verlaging van 5% bij Andernach worden bereikt.

Een snellere aankomst van de hoogwatergolven uit de zijrivieren leidt gemiddeld tot een verlaging van de topafvoeren in de Rijn. Een vertraging zorgt voor een verhoging van de topafvoeren. De reden daarvan is dat de topafvoeren van de zijrivieren langs de Niederrhein zich twee tot drie dagen eerder voordoen dan de topafvoer van de Rijn. Een vertraging van de hoogwaterafloop uit de zijrivieren, bijvoorbeeld door retentiemaatregelen, zou daarom ook negatieve gevolgen hebben voor het hoogwater in de Rijn. Omdat dit soort maatregelen echter meestal ook een reducerend effect op de topafvoer hebben, zouden eventuele negatieve gevolgen voor de topafvoer in de Rijn als gevolg van golfvertraging door deze positieve effecten kunnen worden gecompenseerd. Afhankelijk van het hoogwater kan dit een uitwerking hebben tot 40% van het effect dat met een verhoging respectievelijk verlaging van 5% van de afvoer bij Andernach werd bereikt.

Over het geheel genomen is een goede schatting van de afvoeren bij Andernach van groter belang dan die van de zijrivieren langs de Niederrhein en in Nederland.

11.5 Effect niet meerekenen van het grondwater

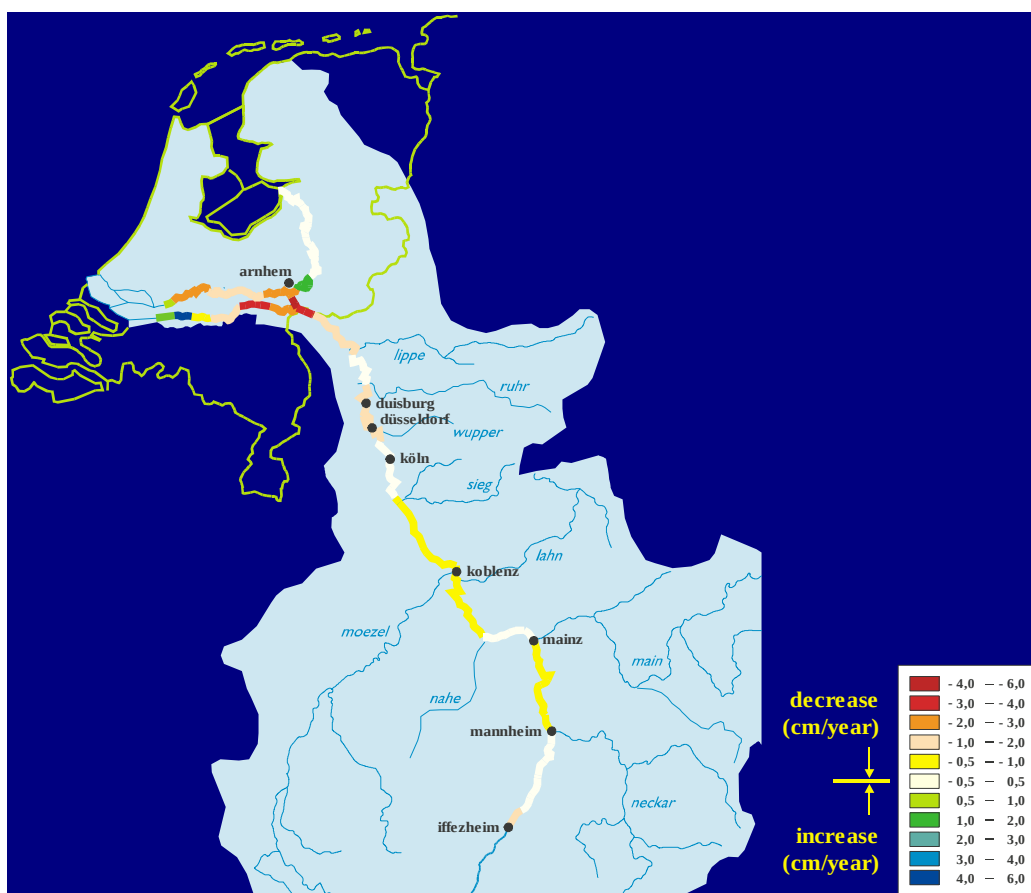
Bij de berekening met SOBEK respectievelijk met het DSS werd ook gelet op de uitwisseling van water tussen de rivier en het grondwater. Van der Veen et al. (2004b) toont aan dat dit nodig is omdat de topafvoeren anders te hoog worden geschat.

11.6 Effect eventuele stijging van de zeespiegel

Een eventuele verandering van de zeespiegel (bijvoorbeeld als gevolg van klimaatverandering) werd door het ophogen van de waterspiegel op de onderste modelrand met SOBEK onderzocht. Zeespiegelstijgingen tot 75 cm hebben volgens deze berekeningen geen effect op de topstanden in het studiegebied (Van der Veen et al., 2004b).

11.7 Effect morfologische ontwikkeling van het zomerbed

Zowel voor het 2D- als het 1D-model wordt gebruik gemaakt van de stroomgebiedtoestand uit 1995. Door de erosie- en sedimentatieprocessen vindt er in het zomerbed van de Rijn echter een morfologische ontwikkeling plaats waarmee in de modellen geen rekening wordt gehouden. Uit Figuur 11-1 blijkt dat de Rijn in het studiegebied over grote delen dieper wordt.



Figuur 11-1: Morfologische ontwikkeling van het zomerbed van de Rijn (bron: Silva et al., 2001).

Omdat de erosie in de Waal geringer is dan in het Pannerdensch Kanaal heeft dit volgens Van der Veen et al. (2004b) een effect op de afvoerverdeling ten nadele van de Waal. De grootste veranderingen in de waterstand kunnen in het gebied benedenstrooms van Köln tot in de Rijntakken worden waargenomen. Bij Düsseldorf kan de waterstand bijvoorbeeld binnen 25 jaar 16 tot 32 cm dalen. Dit komt overeen met een verhoging van de afvoercapaciteit met 300 tot 600 m³/s. Voor 2020 kan daarom alleen al door de erosie van het zomerbed een verhoogde afvoercapaciteit tussen de dijken ontstaan. Bij de beoordeling van de modelnauwkeurigheid moet hiermee rekening worden gehouden.

11.8 Effect uitgangspunt dijkoverstroming met of zonder dijkdoorbraak

11.8.1 Omvang van de overstromingen

Een belangrijk uitgangspunt voor de berekeningen is dat dijken zullen breken als deze overstromen. Het effect van deze aanname op de resultaten kan worden beoordeeld door de berekeningen met dijkbreuk (scenario 1995_DB respectievelijk 2020_DB) direct te vergelijken met de berekeningen waarbij van een dijkoverstroming wordt uitgegaan (scenario 1995_DÜ respectievelijk 2020_DÜ).

- **Realistische extreme hoogwaters (met dijkoverstroming op de Oberrhein)**

Bijlage 4-9 maakt een vergelijking mogelijk tussen HW824 en de toestand 1995. Hieruit blijkt dat de omvang van de getroffen gebieden in het gedeelte tot Dormagen gelijk blijft. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat in dit gedeelte geen dijkdoorbraken plaatsvinden, omdat slechts keermuren en gebieden met hoge oevers overstromen. Vanaf Düsseldorf/Neuß echter zijn in het scenario 1995_DÜ de gebieden die door overstromingen worden getroffen kleiner dan bij de berekeningen met dijkdoorbraak (scenario 1995_DB). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat er bij een dijkdoorbraak duidelijk meer water in de door de dijken beschermde polders kan stromen. Dit wordt vooral duidelijk in het gebied Krefeld/Moers/Kamp-Lintfort. Pas in het scenario met dijkdoorbraak kan water langs Krefeld naar Moers en Kamp-Lintfort stromen, terwijl dit gebied verschoond blijft van overstromingen als de dijken standhouden.

Bijlage 4-10 laat zien welk effect dit heeft op de bereikte waterdiepten in de overstroomde gebieden. Tot de hoogte van Leverkusen/Dormagen verandert er praktisch niets, terwijl er op de linker Rijnsoever vanaf Neuß en op de rechter Rijnsoever bovenstrooms van Düsseldorf in het scenario met dijkdoorbraak door de dijkoverstroming duidelijk grotere waterdiepten ontstaan. Er zijn echter ook gebieden, bijvoorbeeld bij Dormagen (gebieden O_021 en O_022), waar de waterdiepte in het scenario met dijkdoorbraak geringer is, hoewel er in deze gebieden geen dijkdoorbraak optreedt. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de waterspiegel in de Rijn door de dijkdoorbraken daalt in benedenstroomse richting en er als gevolg daarvan minder water in de tegen hoogwater beschermde gebieden (O_021 en O_022) stroomt.

Kwalitatief kunnen dezelfde uitspraken worden gedaan ten aanzien van HW824 voor toestand 2020 (scenario's 2020_DÜ en 2020_DB) en ten aanzien van HW158 voor toestand 1995 (scenario's 1995_DÜ en 1995_DB) evenals voor toestand 2020 (scenario's 2020_DÜ en 2020_DB) (vergelijk Bijlage 4-11 tot en met Bijlage 4-16).

- **Nog extremere extreme hoogwaters (zonder dijkoverstroming op de Oberrhein)**

Ook voor het nog extremere hoogwater HW158 zonder dijkoverstroming op de Oberrhein (HW158ohneDueb) gelden de bovengenoemde uitspraken. Alleen zijn de effecten nog extremer. Bijvoorbeeld bij toestand 1995 (Bijlage 4-17) werken de overstromingen als gevolg van een dijkdoorbraak door dijkoverstroming (scenario 1995_DB) op de linker Rijnoever in het gebied Düsseldorf/Krefeld tot in het gebied Kleve door. De overstromingen strekken zich ook uit naar het gebied in de richting van de Niers, maar de waterscheiding wordt daarbij niet overschreden. Als wordt aangenomen dat de dijken standhouden (scenario 1995_DÜ) dan reikt het getroffen gebied nog niet eens tot Xanten. Overstromingen tussen Xanten en Kleve respectievelijk in de richting van de Niers vinden niet meer plaats. Ook het gebied tussen Krefeld en Kamp-Lintfort/Moers wordt in het scenario met dijkdoorbraak duidelijk zwaarder getroffen door overstromingen dan in het scenario zonder dijkdoorbraak. Als men ervan uitgaat dat dijken in geval van een dijkoverstroming niet zullen breken, kunnen er geheel andere gebieden worden getroffen. Uit Bijlage 4-17 blijkt ook dat bijvoorbeeld op de rechter Rijnoever gebieden tussen Dinslaken en Wesel door overstromingen worden getroffen, die anders in hoge mate verschoond zouden blijven van overstromingen. Door de hogere watertoevoer die bij Emmerich ontstaat als gevolg van het feit dat de dijken niet doorbreken, zijn ook de overstromingen bij Emmerich in het scenario 1995_DÜ groter.

Al deze uitspraken weerspiegelen zich ook in de verschillen tussen de waterdiepten in de scenario's met en zonder dijkdoorbraak als gevolg van een dijkoverstroming (Bijlage 4-18). In het scenario zonder dijkdoorbraak (1995_DÜ) treden geringere waterdiepten vooral op in het gebied op de linker Rijnoever vanaf Krefeld (vanaf gebied D_027 stroomafwaarts), en ook op de rechter Rijnoever tegenover Krefeld tussen Düsseldorf en Duisburg (gebied D_033), en minder duidelijk op de rechter Rijnoever in het gebied bij Düsseldorf (gebieden D_031 en D_023). Bij het scenario zonder dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstromingen kunnen grotere waterdiepten worden vastgesteld in de grensoverschrijdende polder bij Emmerich, en ook op de linker Rijnoever in het gedeelte tussen Köln en Krefeld. In beide gevallen betreft het gebieden waar geen dijkdoorbraak ontstaat, omdat de waterkeringen hier uit keermuren bestaan of omdat er sprake is van gebieden met hoge oevers. Bij Emmerich moet de oorzaak worden gezocht in het feit dat de afvoer hoger is in het scenario zonder dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstroming dan in het scenario met dijkdoorbraak. De oorzaak voor de grotere waterdiepten in het gebied tussen Köln en Krefeld wordt gevormd door de dalingen van de waterspiegel die in de Rijn meer stroomopwaarts ontstaan als gevolg van de dijkdoorbraken bij Krefeld. Daarnaast worden de grotere waterdiepten veroorzaakt door de sterkere parallelstromen achter de dijken.

In principe zijn deze uitspraken ook van toepassing op de scenario's 2020_DB en 2020_DÜ (Bijlage 4-19 en Bijlage 4-20). De door overstromingen getroffen gebieden zijn echter duidelijk kleiner en zullen hier verder niet gedetailleerd worden besproken.

11.8.2 Afvoeren in de Rijn

Uitgaande van een dijkdoorbraak als gevolg van een dijkoverstroming zou men in eerste instantie verwachten dat er ook meer water naar het binnendijkse gebied stroomt en dat daardoor de afvoer en de waterstand in de Rijn lager worden. Toch is dit niet altijd het geval. Als de dijk bijvoorbeeld al duidelijk voor het moment dat in de Rijn de topafvoer wordt bereikt overstromt, dan zou de erachter gelegen polder, in geval ervan wordt uitgegaan dat er door de dijkoverstroming een dijkdoorbraak ontstaat, al gevuld kunnen zijn als de topstand de breuklocatie passeert. De top zou dan niet meer kunnen worden gereduceerd. Gaat men ervan uit dat er geen dijkdoorbraak bij een dijkoverstroming plaatsvindt dan vult de polder zich bij hetzelfde afvoerverloop langzamer. Beschikt de polder op het moment dat de hoogwatertop passeert nog over een resterende retentiecapaciteit dan zal de overstroming door een dijkoverstroming zonder dijkdoorbraak een reducerend effect op de topstand in de rivier hebben. In dat geval zou de hoogwatertop meer stroomafwaarts lager zijn dan in het geval van een dijkdoorbraak als gevolg van een dijkoverstroming. Dit zou ertoe kunnen leiden dat een waterkering net niet overstromt en dat de hoogwatertop op deze plaats niet wordt gereduceerd. Het gevolg daarvan zou kunnen zijn dat de topstand verder stroomafwaarts weer hoger is dan in het scenario met dijkdoorbraak als gevolg van overstromingen. De combinatie van al deze factoren maakt het uiterst moeilijk om een algemene regel te geven ten aanzien van de vraag of het uitgangspunt van een dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstromingen tot hogere of lagere afvoeren in de Rijn leidt dan het uitgangspunt waarbij wordt aangenomen dat de dijken bij een dijkoverstroming standhouden.

De berekeningen gaven echter de volgende trend te zien:

Voor de „realistische“ extreme hoogwaters HW824mitDueb en HW158mitDueb (beide met overstromingen op de Oberrhein) is voor situatie 1995 de waterstand/afvoer in de rivier in het scenario met dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstromingen ongeveer vanaf Krefeld hoger dan in het scenario zonder dijkdoorbraak (Bijlage 4-10 en Bijlage 4-14). Het topstandreducerende effect van overstromingen is in dit geval groter als de dijk standhoudt. In het gebied tussen Düsseldorf en Krefeld is dit effect echter groter als er een dijkdoorbraak ontstaat. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt door het waterstandreducerende effect van de dijkdoorbraak en door de sterkere parallelstroming achter de dijken. Hetzelfde geldt voor de situatie 2020 (Bijlage 4-12 en Bijlage 4-16).

Bij het nog extremere hoogwater HW158ohneDueb (zonder overstromingen op de Oberrhein) ziet dit er anders uit. Zowel voor de toestand 1995 als voor de toestand 2020 hebben de dijkdoorbraken vooral bij Krefeld tot gevolg dat de topstand van het hoogwater gelijk blijft, respectievelijk wordt gereduceerd (Bijlage 4-18 en Bijlage 4-20). Het hoogwater HW158ohneDueb is zo groot dat het bovenste deel van de polders D_027 snel gevuld is en er langs de Rijn een enorme parallelle stroom ontstaat, die voorbij Krefeld/Moers/Xanten tot in het gebied bij Kleve stroomt. Als wordt aangenomen dat de dijk doorbreekt wanneer deze overstromt, leidt deze waterstroom uiteindelijk tot een grotere reductie van de topstand dan wanneer de dijk zou standhouden en deze extreme parallelle stroming zich in het geheel niet ontwikkelt.

Tabel 11-2 geeft een overzicht van alle topafvoeren voor de scenario's met en zonder dijkdoorbraak als gevolg van een dijkoverstroming. In Düsseldorf zijn de verschillen het grootst. Daar zijn de afvoeren in de scenario's met dijkdoorbraak als gevolg van een dijkoverstroming ongeveer 400 tot 700 m³/s kleiner. De

dijkdoorbraken bij het nog extremere hoogwater HW158ohneDueb leiden tot 300 tot 400 m³/s *lagere* afvoeren bij Lobith vergeleken met de situatie dat de dijken blijven staan en alleen overstromen. Bij de meer realistische hoogwaters HW158mitDueb en HW824mitDueb is de afvoer bij Lobith daarentegen 50 tot 100 m³/s *hoger* als ervan uitgegaan wordt dat de dijken breken.

Tabel 11-2: Topafvoeren tussen de dijken; berekeningen Delft-FLS met en zonder dijkdoorbraak als gevolg van dijkoverstroming op de Niederrhein (bron: Gudden, 2004).

Scenario	Hoogwater	KÖLN	DÜSSELDORF	RUHRORT	WESEL	LOBITH
1995_DÜ	HW158ohneDueb	18144	15748	16637	16844	16154
1995_DB	HW158ohneDueb	18146	15331	16171	16387	15787
2020_DÜ	HW158ohneDueb	18117	15722	16490	16695	16649
2020_DB	HW158ohneDueb	18117	15286	16215	16371	16318
1995_DÜ	HW158mitDueb	15641	14673	15201	15399	15047
1995_DB	HW158mitDueb	15641	14045	15473	15635	15195
2020_DÜ	HW158mitDueb	15584	14650	15197	15416	15377
2020_DB	HW158mitDueb	15587	14230	15178	15401	15344
1995_DÜ	HW824mitDueb	15461	14741	15436	15858	15420
1995_DB	HW824mitDueb	15461	13966	15765	16194	15641
2020_DÜ	HW824mitDueb	15468	14752	15436	15869	15860
2020_DB	HW824mitDueb	15462	14286	15576	15989	15944

11.9 Vergelijking van de topafvoeren in de Rijn (2D- en 1D-berekeningen)

In Tabel 11-3 zijn de topafvoeren weergegeven voor een aantal meetstations langs de Rijn. Het blijkt dat rekening moet worden gehouden met het feit dat de resultaten van de modellen Delft-FLS en SOBEK tot 500 m³/s kunnen verschillen. In afzonderlijke gevallen is het verschil zelfs groter.

Tabel 11-3: Topafvoeren tussen de dijken; berekeningen Delft-FLS en SOBEK/DSS.

Scenario	Model	Hoogwater	KÖLN	DÜSSELDORF	RUHRORT	WESEL	LOBITH
1995_M	SOBEK/DSS	HW158ohneDueb	18049	14765	16258	16113	15812
1995_DB	Delft-FLS	HW158ohneDueb	18146	15331	16171	16387	15787
2020_M	SOBEK/DSS	HW158ohneDueb	18019	15347	16729	16547	16571
2020_DB	Delft-FLS	HW158ohneDueb	18117	15286	16215	16371	16318
1995_M	SOBEK/DSS	HW158mitDueb	15513	13955	15051	14929	14873
1995_DB	Delft-FLS	HW158mitDueb	15641	14045	15473	15635	15195
2020_M	SOBEK/DSS	HW158mitDueb	15460	14208	14688	14593	14807
2020_DB	Delft-FLS	HW158mitDueb	15587	14230	15178	15401	15344
1995_M	SOBEK/DSS	HW824mitDueb	15479	13934	15518	15528	15437
1995_DB	Delft-FLS	HW824mitDueb	15461	13966	15765	16194	15641
2020_M	SOBEK/DSS	HW824mitDueb	15432	14251	15093	15104	15412
2020_DB	Delft-FLS	HW824mitDueb	15462	14286	15576	15989	15944

11.10 Samenvatting en conclusies

- De modelreeks neerslaggenerator, neerslag-afvoermodel en waterbewegingsmodel voor de berekening van extreme afvoeren bij Andernach levert waarschijnlijk trendmatig hogere afvoeren op dan op basis van de neerslagvelden te verwachten valt. Voor het fundamentele onderzoek naar de vraag wat er gebeurt als er op de Niederrhein extreme afvoeren optreden, is dit verschil acceptabel. De herhalingsfrequentie kan echter niet eenduidig worden bepaald.
- De berekeningen van de overstromingen op de Oberrhein werden met een eenvoudige aanpak uitgevoerd dan de berekeningen op de Niederrhein (globale aanname m.b.t. dijkhoogte respectievelijk afvoercapaciteit, alleen dijkoverstromingen maar geen dijkdoorbraak, geen parallelle stromen achter de dijken en weer terugstromen verder stroomafwaarts). Dit kan zowel tot te hoge als te lage schattingen van de afvoer bij Andernach leiden, vermoedelijk verschilt dit bij verschillende hoogwaters.
- De afvoer bij Andernach is zeer belangrijk voor de beoordeling van extreme afvoeren op de Niederrhein. Vijf procent meer of minder afvoer bij Andernach leidt tot 500 tot 750 m³/s meer of minder afvoer op de Niederrhein.
- Het effect van een verandering van de afvoeren van de Nederlandse zijrivieren van de Rijn is verwaarloosbaar klein, terwijl het effect van een veranderingen van de afvoeren uit de Duitse zijrivieren duidelijk groter is en grofweg een derde is van het effect van een afvoerverhoging respectievelijk -verlaging van 5% bij Andernach. Over het geheel genomen is een goede schatting van de afvoer bij Andernach van groter belang dan een goede schatting van de zijrivieren langs de Niederrhein en in Nederland.
- Stijgingen van de zeespiegel tot 75 cm, bijvoorbeeld als gevolg van klimaatverandering, hebben geen effect op de topstanden in het studiegebied.
- De erosieprocessen die in het studiegebied in de Rijn kunnen worden waargenomen, vergroten de afvoercapaciteit voor een deel aanzienlijk (in het gebied Düsseldorf bijvoorbeeld met 300 tot 600 m³/s binnen 25 jaar).
- Er bestaat geen algemene regel die een prognose mogelijk maakt van het antwoord op de vraag of de overstromingen kleiner of groter worden als ervan wordt uitgegaan dat de dijken standhouden als deze overstromen.
Tot in het gebied Dormagen treden geen verschillen op, omdat hier slechts muren en hoger gelegen gebieden overstromen. In de meer benedenstrooms gelegen gebieden overstromen, ervan uitgaand dat de dijken standhouden, minder gebieden. In plaats daarvan lopen voor een deel echter geheel andere gebieden onder die anders droog blijven omdat er helemaal geen dijkoverstroming heeft plaatsgevonden.
- Gaat men ervan uit dat de dijken standhouden als deze overstromen, dan zouden bij Düsseldorf topafvoeren ontstaan die ongeveer 400 tot

700 m³/s hoger zijn, omdat er achter de dijken minder water parallel aan de Rijn stroomt. Meer benedenstrooms treden bij het nog extremere hoogwater HW158ohneDueb 300 tot 400 m³/s *hogere* topafvoeren op. Bij de meer realistische hoogwaters (met dijkoverstromingen op de Oberrhein) draait de verhouding om en treden bij Lobith 50 tot 150 m³/s *lagere* topafvoeren op .

- De verschillen tussen de topafvoeren die met SOBEK/DSS zijn berekend en de topafvoeren die met Delft-FLS zijn berekend kunnen oplopen tot 500 m³/s. In afzonderlijke gevallen zijn de verschillen zelfs groter.

Over het geheel maakt de nauwkeurigheidsanalyse duidelijk dat bij de beoordeling en het gebruik van de onderzoeksresultaten moet worden uitgegaan van een nauwkeurigheidsmarge van ongeveer +- 500 m³/s .

12 Conclusies en toekomstperspectief

In opdracht van de *Duits-Nederlandse Werkgroep Hoogwater* werd tussen 2002 en 2004 door de Provincie Gelderland, het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), het Landesumweltamt NRW (LUA NRW) en de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) de studie „Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein“ uitgevoerd.

De kernvragen van dit onderzoek waren:

- Hoeveel afvoer kan er in extreme omstandigheden vanuit het stroomgebied van de Rijn worden verwacht?
- Hoeveel afvoer kan er tussen de dijken via de Niederrhein en de Rijntakken worden afgevoerd? Welke dijkgebieden zullen overstromen en wat zijn de effecten daarvan op de hoogwatergolven?
- Wat gebeurt er als de afvoer niet tussen de dijken kan worden afgevoerd? Welke binnedijkse gebieden zullen overstromen? Kunnen er grensoverschrijdende overstromingen ontstaan?
- Welke effecten hebben hoogwaterreducerende maatregelen?

12.1 Conclusies

Deze studie maakt duidelijk dat er in het stroomgebied van de Rijn neerslagsituaties mogelijk zijn die tot duidelijk hogere afvoeren leiden dan de maatgevende afvoeren in NRW. Als men bijvoorbeeld mogelijke dijkoverstromingen op de Oberrhein buiten beschouwing laat, kunnen bij het meetstation Andernach topafvoeren tot 17800 m³/s ontstaan. Bij de bestudeerde extreme hoogwaters vinden op de Oberrhein overstromingen plaats. Daardoor wordt de topafvoer bij het meetstation Andernach gereduceerd tot ongeveer 15300 m³/s.

Als men dijkoverstromingen op de Oberrhein en de Niederrhein buiten beschouwing laat, kunnen de neerslagen leiden tot een topafvoer van 18700 m³/s bij het meetstation Lobith. De overstromingen, die bij deze afvoeren op de Oberrhein en de Niederrhein ontstaan, leiden tot een sterke vermindering van de topafvoeren, zodat er bij het meetstation Lobith nog maar ongeveer 15500 m³/s valt te verwachten.

In de huidige toestand zullen er bij de bestudeerde extreme hoogwaters op de Niederrhein vanaf een afvoerniveau tussen 11000 tot 16000 m³/s overstromingen ontstaan die zich over grote gebieden uitstrekken. Daarbij wordt de zuidelijke Niederrhein (het gebied Köln/Bonn tot ongeveer Düsseldorf/Dormagen) het eerst getroffen. Als de topafvoer van het hoogwater toeneemt, zal ook het middelste deel (Düsseldorf/Dormagen tot ongeveer de plaats waar de Ruhr in de Rijn uitmondt) overstromen.

In het noordelijke deel (monding van de Ruhr tot in Nederland) ontstaat geen dijkoverstroming, maar er wordt behoorlijk gebruik gemaakt van de beschikbare waakhoogte. Dit traject zou pas gevaar lopen als er bijvoorbeeld door klimaatveranderingen nog hogere afvoeren ontstaan. Alleen in Emmerich moet vanaf een afvoer van 14000 m³/s nog rekening worden gehouden met een overstroming totdat de versterking van de keermuur daar is voltooid.

Door de huidige dijkversterkingen in NRW wordt het beschermingsniveau op enkele plaatsen duidelijk verhoogd. Bij de bestudeerde extreme hoogwaters, die duidelijk boven het niveau van de maatgevende afvoer liggen, verandert de situatie in het zuidelijke en middelste gedeelte van de Niederrhein slechts in die zin dat de gebieden op een later moment zullen onderlopen. Een overstroming kan echter niet worden voorkomen.

In het noordelijke deel wordt door de dijkversterkingen in de toekomst een overstroming van het gebied aan beide zijden van grens voorkomen tot een afvoer van ongeveer 16000 m³/s. Ook op locaties waar zich keermuren met een lagere waakhoogte dan bij dijken bevinden. Voor de Duitse dijktrajecten is de capaciteit groter.

Bij overstromingen ontstaan langs de Rijn parallelle stromingen achter de dijken. Daardoor kunnen ook gebieden onderlopen die eigenlijk door waterkeringen met een hoger beschermingsniveau zijn beveiligd. Een deel van de parallelle stromen vloeit ook weer in de Rijn terug.

Het effect van de retentiepolders op topafvoeren hangt sterk af van de hoogte van de topwaterstand en de vorm van de afvoergolven van het betreffende hoogwater dat werd onderzocht.

Het stelsel van hoogwaterreducerende maatregelen op de Niederrhein in NRW geeft in zijn huidige ontwerp de beste effecten te zien bij situaties met een omvang vergelijkbaar met het hoogwater van 1995. Door het doelgericht inzetten van de maatregelen, vooral van retentiepolders, kan hun topstandreducerende effect op hoogwater in het bereik van de maatgevende afvoer worden verhoogd.

Door de combinatie van effecten van de in Nederland en NRW geplande maatregelen kunnen, volgens het huidige ontwerp van deze maatregelen, dalingen van de waterstanden worden bereikt bij extreme hoogwaters, die boven het maatgevend hoogwater uitstijgen. In het grensgebied kunnen deze dalingen oplopen tot 30 cm en in het gebied Bislich/Lohrwardt tot 25 cm. Als de op dit moment geplande maatregelen in NRW en enkele aanvullende maatregelen, bijvoorbeeld m.b.t. het verwijderen van hydraulische knelpunten, op de maatgevende afvoer worden afgestemd, kunnen in combinatie met de Nederlandse maatregelen waterstanddalingen worden bereikt die bij de grens en in het gebied Bislich/Lohrwardt zelfs tot 40 cm oplopen. Op andere plaatsen is de vermindering van de waterstanden geringer.

Op dit moment kunnen slechts kwalitatieve uitspraken worden gedaan over de vraag in hoeverre de voorspelde klimaatverandering effect zal hebben op de afvoeren in het stroomgebied van de Rijn. Algemeen gaat men er echter van uit dat de extreme hoogwaters in hoogte en frequentie in de toekomst zullen toenemen.

Om toch een uitspraak te kunnen doen ten aanzien van de vraag wat er zal gebeuren als de afvoeren uit het stroomgebied hoger zouden worden, zijn er berekeningen uitgevoerd met een afvoergolf bij het meetstation Andernach waarbij de topafvoer ongeveer 17800 m³/s bedraagt. Door de overstromingen op de Niederrhein zal deze topafvoer naar 16500 m³/s bij het meetstation Lobith dalen. Deze vermindering wordt net als bij de andere berekeningen veroorzaakt door dijkoverstromingen in het gebied tot Krefeld. De overstromingen achter de dijken nemen een nog grotere omvang aan. Bij dit scenario kan water achter de dijken langs Xanten tot aan Kleve stromen. Een

afvoer naar het stroomgebied van de Niers en daarmee in de richting van de Maas heeft zich daarbij niet voorgedaan.

12.2 Toekomstperspectief

De studie laat zien dat een groot aantal van de gestelde vragen slechts grensoverschrijdend kan worden beantwoord en dat er ook een nauwe samenwerking nodig is tussen de autoriteiten in de stroomopwaarts en de stroomafwaarts gelegen gebieden. Daarbij gaat het om het uitwisselen van gegevens en informatie, en ook om het afstemmen van maatregelen op het gebied van de hoogwaterbescherming.

Er staan nog wel verderreikende vragen open zoals:

- In hoeverre kunnen de gegenereerde neerslagvelden aan typische weersgesteldheden worden toegewezen?
- Hoe groot zijn de effecten van klimaatveranderingen op extreme hoogwaterafvoeren?
- Hoe gevoelig reageert het systeem op veranderingen van dijkhoogten en dijkligging?
- Waar kunnen overstromingen al met kleine veranderingen van de waterkeringen worden geminimaliseerd?
- Hoe reageert het systeem op een compartimentering van de binnendijkse gebieden?
- Hoe kunnen aan de in het kader van deze studie berekende topafvoeren herhalingsfrequenties worden toegewezen?
- Welk effect hebben de resultaten van dit onderzoek in de toekomst op de berekening van maatgevende afvoeren?
- Welke consequenties hebben de resultaten voor de hoogwatervoorspelling?

Ook aan de beantwoording van deze vragen zou met gezamenlijke inspanningen verder moeten worden gewerkt.

13 Literatuur

13.1 Deelrapporten

In het kader van het project “Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein” zijn de volgende deelrapporten verschenen:

Eberle, M.; Hammer, M.; Busch, N.; Engel, H.; Krahe, P. und Wilke, K. (2004): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, deelrapport Extreme afvoeren uit het rijnstroomgebied. ISBN 9036956684. (Ook in de Duitse taal beschikbaar onder ISBN 9036956501).

Gudden, J.J. (2004): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, deelrapport Overstromingen in Nordrhein-Westfalen en Gelderland. ISBN 9036956692. (Ook in de Duitse taal beschikbaar onder ISBN 9036956641).

Hartman, M.R. (2002): Draaiboek afstemming BOS-IR – Delft FLS HKV-lijn in water, opdrachtgever Rijkswaterstaat RIZA, Oktober 2002.

Kroekenstoel, D.F.; Veen, R. van der und Brinkmann, M. (2003): Studie afvoercapaciteit Niederrhein, Verkennende berekeningen met het BOS Inrichting Rivieren. RIZA-werkdocument 2003.27X.

Landesumweltamt NRW (2003): Bestandsaufnahme und Datenrecherche zur Studie "Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein"; Bericht und Anlagen. Bearbeitet durch Buchholz, O.; Friedeheim, S.; Wegelein, D. und Bangel, H. der Hydrotec, Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen.

Mehlig, B. (2004): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, deelrapport Waterstandsverlagende maatregelen in NRW en Nederland ISBN 9036956706. (Ook in de Duitse taal beschikbaar onder ISBN 9036956665).

Mierlo, M.C.L.M. van; Gudden, J.J. und Overmars, J.M.S. (2003): Calibratie Delft-FLS model, NoordRijn Westfalen en Gelderland. Rapport juni 2003, WL | Delft Hydraulics. Opdrachtgever Provincie Gelderland (nl.).

Veen, R. van der; Lammersen, R.; Kroekenstoel, D.F. und Brinkmann, M. (2004a): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, deelrapport Invoergegevens BOS-IR Niederrhein-Rijntakken, ISBN 9036956714. (Ook in de Duitse taal beschikbaar onder ISBN 9036956668).

Veen, R. van der; Kroekenstoel, D.F. und Brinkmann, M. (2004b): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein, deelrapport Berekeningen BOS-IR Niederrhein-Rijntakken, ISBN 9036956722. (Ook in de Duitse taal beschikbaar onder ISBN 9036956676).

13.2 Andere literatuur

Busch, N.; Chojetzki, U.; Engel, H. und Gundert, P.J. (1994):

Wasserspiegellagenberechnungen am Rhein vom Pegel Köln bis zur deutsch/niederländischen Grenze, BfG-Bericht Nr. 862, 29 S., 9 Anlagen.

Dijkman, J.P.M.; Ogink, H.J.M.; Klijn, F.; van der Most, H. en anderen (2003):

Toelichting aanvullend deskundigenoordeel noodoverloopgebieden, WL | Delft Hydraulics, in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat Generaal Water, augustus 2003.

ICBR (Ed.) (1998): Actieplan Hoogwater, Koblenz.

ICBR (Ed.) (1999): Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Einzugsgebiet des Rheins, Koblenz.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): IPCC Third

Assessment Report - Climate Change 2001. Deutsche Übersetzung von <http://www.ipcc.ch/pub/nonun.htm>.

Kleinn, J. (2002): Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate - Runoff Model. PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Proefschrift No. 14663. Zürich.

Krahe, P. (2003): Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf Hydrologie und Wasserwirtschaft im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Oktober 2003. Koblenz.

Kwadijk, J.C.J. (1993): The impact of climate change on the discharge of the river Rhine. Proefschrift Universiteit Utrecht. KNAG/NGS publication 171.

LUA [Ed.], (2002): Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten HQ_T an den Pegel des Rheins. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA), Essen 2002, ISSN 1610-9619.

MUNLV-NRW (2003): Neufestsetzung des Bemessungshochwassers für den Rhein, Schreiben des Ministeriums für Umweltschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen an die Bezirksregierung Düsseldorf und die Bezirksregierung Köln vom 18. September 2003.

Schneider, G. (1996): Das Bemessungshochwasser, Ermittlung gestern und heute (persoonlijke mededeling).

Silva, W.; Dijkman, J. und Klijn, F. (2000): Ruimte voor Rijntakken, wat het onderzoek ons heeft geleerd, RIZA-nota 2000.026 en WL-rapport R3294, ISBN 9036953235.