Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA

Onderzoek afvoer Oude IJssel

Uitgangspunten voor RVW2006

WV135

HKV LIJN IN WATER

PR803

oktober 2004

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA

Onderzoek afvoer Oude IJssel

Uitgangspunten voor RVW2006

PROV. BESTUUR VAN GELDERLAND
Ind.nr.:
KOPIE GEZ. AAN
Ingek. 10 FEB. 2005
Class.nr.:
TE BEH. DOOR
KOPIE AAN

Auteurs: T. Botterhuis
D. Klopstra

PR803

oktober 2004

HKV LIJN IN WATER

Inhoud

Lijst van tabellen v

Lijst van figuren vii

1 Inleiding 1-1
- 1.1 Aanleiding tot het onderzoek 1-1
- 1.2 Probleembeschrijving 1-1
- 1.3 Doelstelling 1-3
- 1.4 Aanpak en leeswijzer 1-3
- 1.5 Projectorganisatie 1-4

2 Beschikbare gegevens 2-1
- 2.1 Inleiding 2-1
- 2.2 Gebiedsgegevens 2-1
- 2.3 Validatie neerslaggegevens 2-3
- 2.4 Validatie afvoergegevens 2-5
- 2.5 Hydraulische modellering Oude IJssel en Rijntakken 2-8

3 Modellering Oude IJssel 3-1
- 3.1 Inleiding 3-1
- 3.2 Neerslag-afvoermodellering Oude IJssel 3-1
  - 3.2.1 Beknopte beschrijving van Sacramento 3-1
  - 3.2.2 Schematisatie van het stroomgebied in Sacramento 3-3
  - 3.2.3 Kalibratie en verificatie van het neerslag-afvoermodel 3-4
- 3.3 Hydraulische modellering Oude IJssel 3-5
  - 3.3.1 Koppeling van neerslag-afvoermodel aan hydraulisch model 3-5
  - 3.3.2 Verificatie afvoer Oude IJssel bij stuw de Pol 3-7
  - 3.3.3 Verificatie herhalingstijden afvoer bij stuw de Pol 3-12
- 3.4 Koppeling van Oude IJssel aan het Rijntakken model 3-14

4 Analyse afvoer Oude IJssel 4-1
- 4.1 Inleiding 4-1
- 4.2 Relatie afvoer Oude IJssel de Pol - Doesburg 4-1
- 4.3 Relatie afvoer Rijn (Lobith) en Oude IJssel (Doesburg) 4-5
  - 4.3.1 Samenhang afvoergolf Rijn en Oude IJssel 4-5
  - 4.3.2 Topafvoer Rijn en Oude IJssel 4-8
  - 4.3.3 Topafvoer Rijn en afvoer Oude IJssel bij passage top op Gelderse IJssel 4-10
  - 4.3.4 Topafvoer Rijn en faseverschil Rijn - Oude IJssel 4-11
  - 4.3.5 Samenvatting relatie afvoer Rijn en Oude IJssel 4-12
- 4.4 Statistische beschouwing afvoer Oude IJssel 4-13
- 4.5 Afvoer Oude IJssel voor RWV2006 4-15

5 Conclusies 5-1

6 Referenties 6-1

Bijlage A: Kalibratie neerslag-afvoermodel A-1

Bijlage B: Verificatie neerslag-afvoermodel B-1

Bijlage C: Basisgegevens samenhang afvoergolven C-1

Bijlage D: Effect waterstand Gelderse IJssel op afvoer Oude IJssel D-1

Bijlage E: Gemiddeld afvoerverloop Oude IJssel E-1

Lijst van tabellen

Tabel 2-1: Oppervlak van deelstroomgebieden in het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-1
Tabel 2-2: Berekening looptijden in het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-3
Tabel 2-3: Beschikbare neerslaggegevens. 2-4
Tabel 2-4: Beschikbare afvoergegvens. 2-5
Tabel 3-1: Parameters die in het Sacramento model moeten worden opgegeven. 3-2
Tabel 3-2: Initiële schatting van de Sacramento parameters. 3-4
Tabel 3-3: Gekozen waarde van de Sacramento parameters. 3-5
Tabel 3-4: Koppeling laterale instroompunten Sobek-RE en neerslag-afvoerrelatie Sacramento. 3-6
Tabel 3-5: Toetsing volume, top debiet en timing top van afvoergolven van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 12 hoogwater perioden. 3-12
Tabel 3-6: Uurafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol bij herhalingstijden 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250 en 1250 jaar. 3-13
Tabel 3-7: Gemiddelde dagafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol bij herhalingstijden 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250 en 1250 jaar. 3-14
Tabel A-1: Kalibratie perioden. A-1
Tabel A-2: Gekalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol. A-4
Tabel A-3: Gecalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie Isselburg. A-8
Tabel A-4: Gecalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie Rhedebrügge. A-12
Tabel A-5: Vergelijking tussen kalibratie parameters van de neerslag-afvoerrelaties de Pol, Isselbrug en Rhedebrügge. A-13
Tabel C-1: Samenhang tussen afvoergolven op de Oude IJssel bij de Pol en Doesburg. C-3
Tabel C-2: Samenhang tussen afvoergolven op de Rijn bij Lobith en de Oude IJssel bij Doesburg. C-6
Tabel E-1: Randvoorwaarde Oude IJssel voor RVW2006. ..... E-2

Lijst van figuren

Figuur 2-1: Overzicht van het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-2
Figuur 2-2: Grote beken in het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-2
Figuur 2-3: Locatie van de neerslagstations t.o.v. het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-4
Figuur 2-4: Validatie van daggevens neerslag met behulp van de 'double mass' analyse. 2-5
Figuur 2-5: Locatie van de afvoerstations in het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-6
Figuur 2-6: Validatie van daggegevens afvoer met behulp van een waterbalans. 2-6
Figuur 2-7: Verloop van de afvoer op de locatie stuw de Pol, Isselburg en Rhedebrügge. 2-7
Figuur 2-8: Locatie van kunstwerken in het SOBEK-RE model van het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-8
Figuur 2-9: Locatie rand- en laterale voorwaarden in het SOBEK-RE model van het stroomgebied van de Oude IJssel. 2-9
Figuur 2-10: Schematisatie van de Rijntakken in SOBEK-RE. 2-10
Figuur 3-1: Ligging van Doesburg, de Pol, Isselburg en Rhedebrügge. 3-3
Figuur 3-2: Deelstroomgebieden die als rand- of laterale voorwaarden aan het SOBEK-RE model van Oude IJssel worden opgelegd. 3-6
Figuur 3-3: Toetsing afvoerverloop van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 10 hoogwater perioden. 3-8
Figuur 3-4: Toetsing cumulatief afvoerverloop van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 10 hoogwater perioden. 3-10
Figuur 3-5: Baysiaanse analyse van de frequentieverdeling van de jaarmaxima van uurafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol. 3-13
Figuur 3-6: Schematisatie van de Rijntakken en Oude IJssel in SOBEK-RE. 3-15
Figuur 4-1: Stroomgebied van de Oude IJssel boven- en benedenstrooms van stuw De Pol. 4-2
Figuur 4-2: Verloop van de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en De Pol, hoogwater 1946. 4-2
Figuur 4-3: Relatie tussen de topafvoer op de Oude IJssel bij de Pol en Doesburg. 4-3
Figuur 4-4: Relatie afvoer Oude IJssel de Pol – Doesburg tijdens afvoermaximum op de Gelderse IJssel. 4-4
Figuur 4-5: Faseverschil afvoer Oude IJssel de Pol – Doesburg tijdens afvoermaximum op de Rijn. 4-4
Figuur 4-6: Afvoergolven op de Rijn en de Oude IJssel gedurende perioden, waarbij de topafvoer bij Lobith groter is dan 8000 m3/s. 4-8
Figuur 4-7: Topafvoer op de Oude IJssel als functie van de topafvoer op de Rijn. 4-9
Figuur 4-8: Lineair verband tussen de topafvoer op de Rijn en de topafvoer op de Oude IJssel. 4-10
Figuur 4-9: Afvoer op de Oude IJssel op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel Doesburg passeert als functie van de topafvoer op de Rijn. 4-11
Figuur 4-10: Faseverschil tussen de topafvoer op de Oude IJssel en de topafvoer op de Rijn. 4-12
Figuur 4-11: Afvoergolven op de Oude IJssel behorende bij de hydrologische jaarmaxima op de Rijntakken. 4-13
Figuur 4-12: Het gemiddelde verwachte afvoerverloop van de Oude IJssel bij een hoogwater op de Rijntakken. 4-14
Figuur 4-13: Gemiddelde verwachte afvoerverloop van de Oude met de percentielen bij een hoogwater op de Rijntakken. 4-15
Figuur A-1: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol. A-3
Figuur A-2: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol. A-4
Figuur A-3: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie Isselburg. A-6
Figuur A-1: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie Isselburg. A-8
Figuur A-5: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge. A-10
Figuur A-6: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge. A-12
Figuur B-1: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol. B-1

Figuur B-2: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk. B-2
Figuur B-3: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem. B-3
Figuur B-4: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg. B-4
Figuur B-5: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk. B-5
Figuur B-6: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem. B-6
Figuur B-7: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge..... B-7
Figuur B-8: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk. B-8
Figuur B-9: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem B-9
Figuur D-1: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het gemiddelde afvoerverloop van de Oude IJssel. D-1
Figuur D-2: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het 5% afvoerverloop op de Oude IJssel. D-2
Figuur D-3: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het 95% afvoerverloop op de Oude IJssel. D-2
Figuur D-4: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in De Pol voor het 95% afvoerverloop op de Oude IJssel. D-3

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het onderzoek

Met de invoering van de Wet op de Waterkeringen wordt iedere vijf jaar een randvoorwaardenboek (HR) uitgebracht met daarin de hydraulische randvoorwaarden voor alle primaire waterkeringen in Nederland. Voor de Rijntakken worden de hydraulische randvoorwaarden berekend op basis van de best mogelijke schatting van de maatgevende afvoer in Lobith en de bijbehorende zijdelingse toestromingen vanuit het Nederlandse gedeelte van het stroomgebied. Met behulp van een hydrodynamisch model (WAQUA) wordt de vastgestelde maatgevende afvoer (met een gemiddelde jaarlijkse kans van voorkomen van 1/1250) vertaald naar maatgevende hoogwaterstanden (MHW) in het gebied.

Voor Lobith is een gehomogeniseerde afvoerreeks (metingen) met een lengte van ongeveer 100 jaar beschikbaar, op basis waarvan met behulp van daartoe geëigende statistische technieken de maatgevende afvoer wordt bepaald. Voor de zijdelingse toestromingen geldt dat veel minder basisgegevens beschikbaar zijn om de optredende afvoeren bij de maatgevende afvoer in Lobith vast te stellen. Hoewel de MHW's langs de Rijntakken vooral worden bepaald door de maatgevende afvoer in Lobith, hebben de zijdelingse toestromingen een niet te verwaarlozen effect. In HR2001 is duidelijk geworden dat de invloed van de zijdelingse toestroming op de MHW's langs de Gelderse IJssel ca. 0,15-0,30 m bedraagt. In het kader van HR2006 bestaat nu de wens om de methode, waarmee de zijdelingse toestroming van de Oude IJssel wordt bepaald, zo mogelijk te verbeteren.

1.2 Probleembeschrijving

In de huidige situatie wordt ten behoeve van vaststelling van de hydraulische randvoorwaarden de zijdelingse toestroming van de Oude IJssel (OY) geschat op basis van een regressiefunctie die een relatie legt met de afvoer van de Rijn in Lobith:

Afvoer OY = 0,00594 * afvoer Lobith (+3 dagen) - 5,091 [m3/s]

Deze regressiefunctie is afgeleid op basis van een vergelijking van het afvoermaximum van de Rijn bij Lobith in hoogwatersituaties met het daarbij optredende afvoermaximum op de Oude IJssel. Beschikbare afvoergegevens van de OY uit de periode 1971-1991 zijn hiervoor gebruikt.

Uit de regressiefunctie blijkt dat de topafvoer op de Oude IJssel gemiddeld drie dagen eerder optreedt dan de topafvoer in Lobith. Oorzaken hiervoor zijn:

i) dat de reactiesnelheid van het stroomgebied van de Oude IJssel groter is dan het veel omvangrijkere stroomgebied van de Rijn waardoor de 'time to peak' kleiner is en
ii) dat, hoewel dat waarschijnlijk in mindere mate een rol speelt, de neerslag die het hoogwater op de Rijn veroorzaakt eerder is gevallen in het stroomgebied van de Oude IJssel aangezien depressies zich over het algemeen in oostelijke richting verplaatsen.

De kracht van de gevonden regressiefunctie zit hem in de eenvoud en de robuustheid aangezien ten alle tijde een schatting kan worden gemaakt van de afvoer van de Oude IJssel, gegeven de

afvoer in Lobith. Ook voor operationele hoogwatervoorspelling is dit van belang in het geval de meting van de afvoer van de Twentekanalen (waarmee de afvoer van de Oude IJssel is gecorreleerd) wegvalt. Tot op heden werd de nauwkeurigheid van de regressiefunctie als voldoende beschouwd voor zowel de toepassing voor de hydraulische randvoorwaarden als operationele hoogwatervoorspelling.

Ten aanzien van de gebruikte regressiefunctie en het resultaat daarvan is ook een aantal tekortkomingen aan te wijzen:

1. De regressiefunctie:
   - De kwaliteit van de basisgegevens is onbekend, de periode waarover de gegevens bekend zijn (1971-1991) is beperkt en enigszins gedateerd.
   - De gevonden correlatie is vrij zwak, de correlatie-coëfficiënt is (na middeling van afvoeren in afvoerklassen) gelijk aan 0,67. Het is de vraag of deze correlatie statistisch gezien significant is.
   - Bij extrapolatie van de regressiefunctie tot in het maatgevende afvoerbereik wordt geen rekening gehouden met het systeemgedrag van de Oude IJssel onder dergelijke omstandigheden, zoals het optreden van inundaties.
2. De resulterende golfvorm:
   - Als gevolg van de gekozen werkwijze is de golfvorm op de Oude IJssel gelijk aan de golfvorm van de Rijn in Lobith. De top van de afvoer van de Oude IJssel is lager, echter de basis van de golf is even lang. De reactietijd van het veel kleinere stroomgebied van de Oude IJssel is veel kleiner (18 uur tot een dag) waardoor de afvoergolf korter duurt dan de afvoergolf van de Rijn in Lobith.
3. De topafvoer:
   - Als gevolg van de werkwijze met de regressiefunctie op basis van klasse-gemiddelde afvoeren komt de golftop van de zijrivieren in het algemeen betrekkelijk laag uit. Naar verwachting is de afvoer van het veel kleinere stroomgebied van de Oude IJssel spitser dan het afvoerverloop van het veel grotere stroomgebied van de Rijn bovenstrooms van Lobith. Voor de Oude IJssel worden hogere golftoppen verwacht dan de regressiefunctie weergeeft.

Hoewel het resultaat van het samenspel van deze foutenbronnen niet precies bekend is, kan wel worden beschreven wat de invloed daarvan is op de geschatte afvoergolf van de Oude IJssel. Het belangrijkste effect is dat de afvoer van de Oude IJssel waarschijnlijk wordt overschat op het moment dat de afvoer op de Gelderse IJssel de hoogste waarde bereikt. Daardoor worden ook de maatgevende hoogwaterstanden langs de Gelderse IJssel mogelijk te hoog berekend. De overschatting van de afvoer van de Oude IJssel wordt met name veroorzaakt door de golfvorm van de Rijn in Lobith die één op één terugkomt in de golfvorm van de Oude IJssel, terwijl de afvoergolf op de Oude IJssel in werkelijkheid korter duurt.

De voorlopige conclusies van een conceptrapport van WL | Delft Hydraulics getiteld 'Zijdelingse toestroming IJssel' bevestigen de tekortkomingen in de beschreven gebruikte methode waarmee de afvoer van de Oude IJssel, gegeven de afvoer van de Rijn in Lobith, wordt bepaald.

Naar aanleiding hiervan heeft Rijkswaterstaat RIZA een uitgebreide inventarisatie naar beschikbare basisgegevens van de zijdelingse toestromingen van de Rijntakken uitgevoerd. Dit heeft niet geleid tot een belangrijke verbetering van de lengte en kwaliteit van de beschikbare tijdreeksen, zodat de beschrijving van de afvoergolf van de Oude IJssel niet werkelijk kan worden verbeterd op basis van afvoergegevens alleen. Om desondanks betere uitspraken te kunnen doen ten aanzien van de afvoer van de Oude IJssel, gegeven het afvoerverloop van de Rijn in Lobith, moet meer vanuit de samenhang tussen de afvoer bij Lobith, de neerslag in het stroomgebied van de Oude IJssel en het neerslag-afvoerproces geredeneerd worden.

Van het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Oude IJssel is van de stations Denekamp, Heerde, Arnhem en Winterswijk 100 jaar neerslag (dagsommen om 9:00 uur) beschikbaar. Er is getracht ook metingen van het duitse neerslagstation te Bocholtz. Echter, deze metingen waren bij de start van het onderzoek nog niet verkregen. Met behulp van de beschikbare neerslaggegevens, de oppervlaktes van de belangrijkste deelstroomgebieden en afvoermetingen van de Pol, Isselburg en Rhedebrügge kan een eenvoudig neerslag-afvoermodel van de Oude IJssel worden ontwikkeld. Met dit neerslag-afvoer model kan een afvoerreeks van de Oude IJssel met een lengte van 100 jaar worden gegenereerd. Daarmee ontstaat een homogene afvoerreeks (met een veel grotere lengte dan is gebruikt voor de eerder beschreven regressiefunctie) op basis waarvan uitspraken kunnen worden gedaan over de samenhang van de afvoer van de Oude IJssel en hoogwaters op de Rijn.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is om met behulp van een neerslag-afvoermodel van de Oude IJssel te komen tot een zo goed mogelijke beschrijving van het verloop van de afvoer van de Oude IJssel gegeven het verloop van de afvoer van de Rijn in Lobith tijdens hoogwater situaties.

1.4 Aanpak en leeswijzer

De verzamelde gegevens en de belangrijkste eigenschappen van het stroomgebied van de Oude IJssel worden beschreven in hoofdstuk 2.

Om de samenhang van de afvoergolven op de Oude IJssel en de Rijntakken vast te stellen wordt als eerste stap een neerslag-afvoermodel van de Oude IJssel ontwikkeld. Met dit model wordt een langjarige afvoerreeks gegenereerd, aangezien langjarige metingen van de afvoer van de Oude IJssel ontbreken. De bouw en de kalibratie van het neerslagafvoermodel wordt beschreven in hoofdstuk 3.

De samenhang tussen hoogwaters op de Rijntakken en hoogwaters op de Oude IJssel wordt vervolgens met behulp van de gegenereerde reeks vastgesteld in hoofdstuk 4. Dit leidt uiteindelijk tot een verloop van de afvoer van de Oude IJssel tijdens maatgevende condities., welke ook in hoofdstuk 4 is beschreven

In hoofdstuk 5 worden de conclusies van het onderzoek naar de afvoer van de Oude IJssel nog eens kort samengevat.

1.5 Projectorganisatie

Aan het onderzoek Afvoer Oude IJssel werkten drie organisaties mee. Rijkswaterstaat RIZA als opdrachtgever, Waterschap Rijn en IJssel (WRIJ) als projectbegeleider en HKV LIJN IN WATER als opdrachtnemer. Namers deze organisatie zaten de volgende personen in het projectteam:

Rijkswaterstaat RiZA:	dhr. R. van der Veen
Waterschap Rijn en IJssel:	dhr. R. van der Veen
HKV LIJN IN WATER:	dhr. D. Klopstra dhr. T. Botterhuis

2 Beschikbare gegevens

2.1 Inleiding

De volgende gegevens, die nodig voor het onderzoek naar de afvoer van de Oude IJssel, zijn verzameld:

- Oppervlaktes deelstroomgebieden.
- Globale gegevens over bodemsoort en landgebruik zijn via mondelinge communicatie met het waterschap Rijn en IJssel vastgesteld.
- Neerslaggegevens (circa 100 jaar) op dagbasis van de stations Denekamp, Heerde, Arnhem, Winterswijk.
- Verdampingsgegevens (circa 100 jaar) op dagbasis van het station de Bilt.
- Afvoergegevens van de Oude IJssel op de locaties Rhedebrügge, Isselburg en de Pol.
- Afvoergegevens van de Rijn in Lobith over de periode 1901-2000.
- Sobek-RE model van de Oude IJssel.
- Sobek-RE model van de Rijntakken.

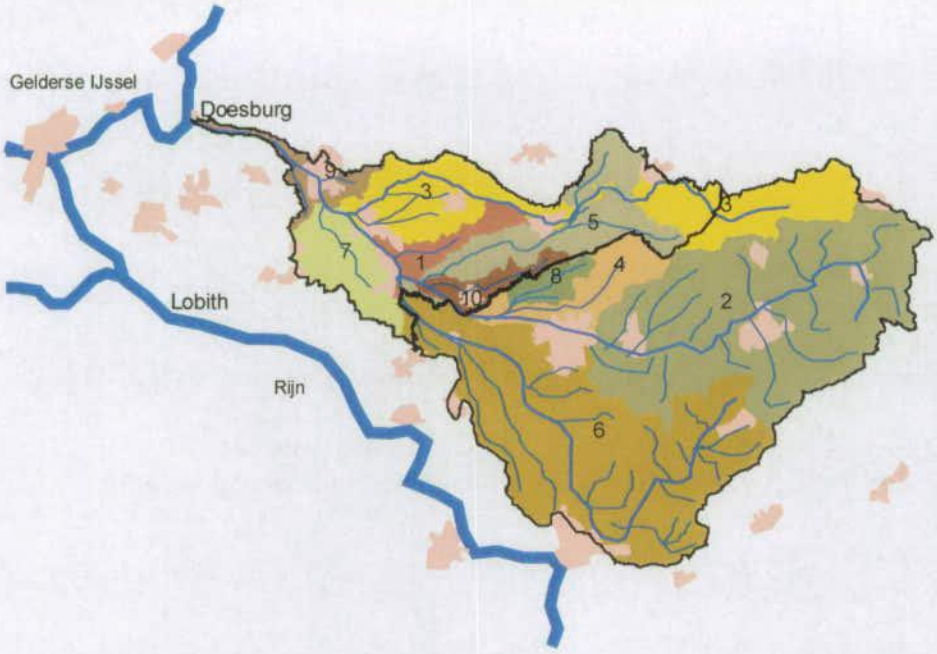
De oppervlakten van deelstroomgebieden en de globale gegevens van landgebruik en bodemsoort worden gebruikt voor de schematisatie van het neerslag-afvoermodel van het stroomgebied van de Oude IJssel. Neerslag- en verdampingsgegevens zijn invoer voor de neerslag-afvoerberekeningen. De afvoergegevens zijn gebruikt om het neerslag-afvoermodel te kalibreren en te verifiëren. In paragraaf 2.3 en 2.4 wordt de bruikbaarheid van deze tijdafhankelijke gegevens getoetst. In paragraaf 2.5 staat een zeer beknopte beschrijving van de hydraulische modellering van de Oude IJssel en de Rijntakken.

2.2 Gebiedsgegevens

Door het waterschap Rijn en IJssel is een Arcview shape file aangeleverd met de oppervlakken van de onderscheiden deelstroomgebieden volgens Figuur 2-1. De oppervlakken van deze deelstroomgebieden zijn weergegeven in Tabel 2-1.

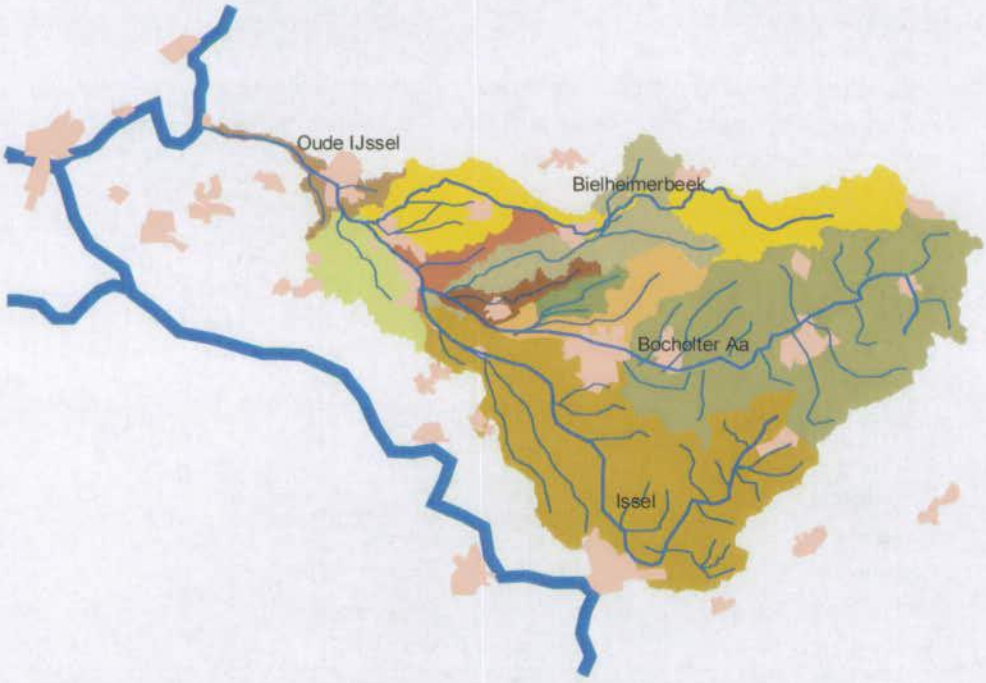
nummer	deelstroomgebieden	oppervlak [ha]
1	Bergerslagbeek	3.021
2	BocholterAa	35.493
3	Bielheimerbeek	17.107
4	Holtwicherbach	5.563
5	Keizersbeek	9.720
6	OudeIJssel	36.318
7	WaalseWater	5.959
8	Wielbach	1.850
9	Wijnbergseloopgraaf	3.246
10	ZwarteBeek	2.584
	totaal	120.861

Tabel 2-1: Oppervlak van deelstroomgebieden in het stroomgebied van de Oude IJssel.



Figuur 2-1: Overzicht van het stroomgebied van de Oude IJssel.

Zeventig procent van het stroomgebied ligt in Duitsland. Door twee hoofdwaterlopen, de Issel en de Bocholter Aa, wordt het water naar Nederland afgevoerd. Bij de Ulft komen deze twee takken samen en gaan over in de Oude IJssel. In Nederland monden diverse kleine beekjes in de Oude IJssel uit. Benedenstrooms van stuw de Pol takt nog een grote ader, de Bielheimerbeek, aan.



Figuur 2-2: Grote beken in het stroomgebied van de Oude IJssel.

Het maaiveldniveau in het stroomgebied van de Issel loopt van 55,5 m+NAP in het oosten tot 11,8 m+NAP bij de Nederlandse grens. Het maaiveld in het stroomgebied van de Bocholter Aa daalt van oost naar west van 69,5 m+NAP naar 14,9 m+NAP. De Bielheimerbeek overbrugt een hoogteverschil van 53,4 m+NAP in Duitsland naar ongeveer 11 m+NAP in Nederland. Vanaf stuw de Pol naar Doesburg overbrugt de Oude IJssel een hoogte verschil van 2 meter. De lengte van de Issel is ongeveer 50 km, de Bocholter Aa heeft een lengte van 55 km en de Bielheimerbeek meet zo'n 40 km. De concentratietijd van hoogwatergolven in deze deelstroomgebieden kan worden geschat met de formule van Kirpich (Smedema en Rycrofft, 1988).

Tc = (L^1,15)/(3080*H^0,38)

Tc = concentratietijd [uren]
L = maximum afstand in het stroomgebied [m]
H = hoogteverschil over bovenstaande afstand [m]

Deelstroomgebied	hoogteverschil [m]	lengte [m]	concentratietijd [uren]
Bielheimerbeek	42,4	40.000	15
Bocholter Aa	54,6	55.000	20
Issel	43,7	50.000	18

Tabel 2-2: Berekening looptijden in het stroomgebied van de Oude IJssel.

Uit de berekening blijkt dat de concentratietijden in het stroomgebied van de Oude IJssel naar schatting kleiner zijn dan een dag, namelijk ongeveer 18 uur.

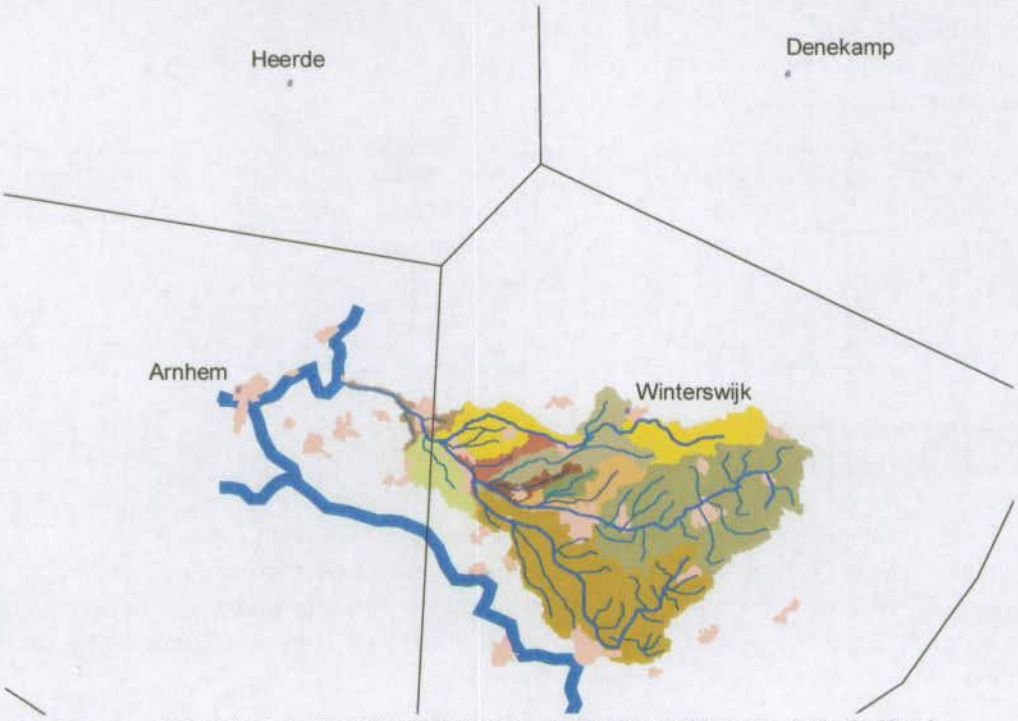
De bodem in het stroomgebied van de Oude IJssel bestaat voornamelijk uit zand- en keileemgronden. De hoger gelegen delen hebben een ondergrond van keileem en een toplaag van zand. De dalen bestaan voornamelijk uit zandgronden. Van het grondgebruik bedraagt akkerbouw 50 tot 60 procent, het stedelijk gebied wordt geschat op 5 procent, bosgebied is zo'n 10 procent het overige gedeelte is voornamelijk grasland.

2.3 Validatie neerslaggegevens

Door het RIZA zijn daggegevens van vier neerslag stations toegeleverd, namelijk Arnhem, Heerde, Denekamp en Winterwijk. In Tabel 2-6 staat een overzicht van de beschikbare neerslaggegevens en in Figuur 2-3 is de locatie van de stations weergeven.

Neerslagstation	Beschikbare gegevens
Arnhem	dagwaarden vanaf 01-06-1906 t/m 31-12-2000
Denekamp	dagwaarden vanaf 01-01-1905 t/m 31-12-2000 (ontbrekend 11-12-1956 t/m 31-12-1956, 01-06-1957 t/m 30-06-1957, 01-08-1957 t/m 28-08-1957, 01-12-1958 t/m 10-01-1959, 21-03-1959 t/m 20-04-1959, 01-08-1959 t/m 31-08-1959, 01-10-1959 t/m 31-10-1959)
Heerde	dagwaarden vanaf 01-01-1901 t/m 31-12-2000 (ontbrekend 01-04-1952 t/m 17-04-1952)
Winterswijk	dagwaarden vanaf 01-01-1901 t/m 31-12-2000

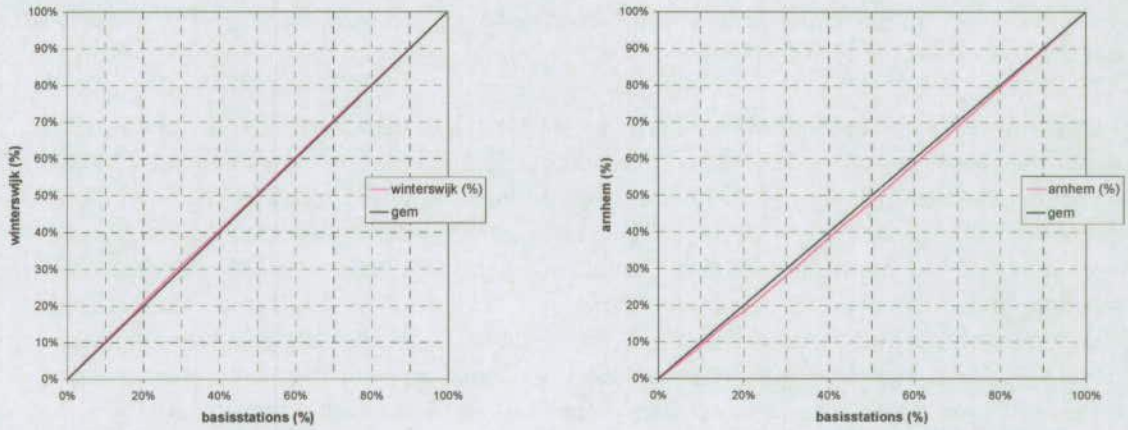
Tabel 2-3: Beschikbare neerslaggegevens.



Figuur 2-3: Locatie van de neerslagstations t.o.v. het stroomgebied van de Oude IJssel.

In Figuur 2-3 is een analyse met behulp van een Thiessennet uitgevoerd. Dit net is in de figuur zichtbaar middels de zwarte lijnen. Hieruit blijkt dat bijna het gehele stroomgebied alleen door het station te Winterswijk wordt beïnvloed (97%). Slechts een gering oppervlak staat onder invloed van het station te Arnhem (3%). Dit aandeel is zo gering dat de gebiedsgemiddelde neerslag wordt bepaald op basis van de gegevens van Winterswijk. Waar nodig zullen wel gevoeligheidsanalyses met station Arnhem worden uitgevoerd.

Neerslaggegevens worden in Nederland over het algemeen niet gevalideerd. Om met behulp van het neerslag-afvoermodel te komen tot een homogene langjarige afvoerreeks van de Oude IJssel is een eerste voorwaarde dat de neerslagreeksen van Arnhem en Winterswijk ook homogeen zijn. Dit wordt getoetst met behulp van de 'double mass' analyse, een krachtig hulpmiddel om inhomogeniteiten in neerslagreeksen op te sporen.



(a) neerslagstation winterwijk (b) neerslagstation Arnhem

Figuur 2-4: Validatie van daggevens neerslag met behulp van de 'double mass' analyse.

Uit Figuur 2-4 blijkt dat station Winterswijk bruikbaar is voor het berekenen van een homogene langjarige afvoerreeks van de Oude IJssel. Station Arnhem heeft een inhomogeniteit rond het jaar 1927 (20% in figuur). Voor 1927 wordt naar verhouding circa 10% minder neerslag gemeten dan daarna. Deze trendbreuk is bijvoorbeeld het gevolg van een wijziging in de meetopstelling of meetlocatie. De jaren 1906 t/m 1927 moeten gecorrigeerd worden voor deze onregelmatigheid. Omdat i) Arnhem voor slechts 3% meeweegt in de gebiedsgemiddelde neerslag en ii) om die reden niet wordt gebruikt voor de bepaling van de gebiedsgemiddelde neerslag en iii) de bron van de inhomogeniteit niet meer is te achterhalen, is dit achterwege gelaten.

2.4 Validatie afvoergegevens

Door het RIZA zijn dag- en uurgegevens van drie afvoerstations toegeleverd, namelijk Stuw de Pol, Isselburg en Rhedebrügge. In Tabel 2-9 staat een overzicht van de beschikbare afvoergegevens en in Figuur 2-5 is de locatie van de stations weergeven.

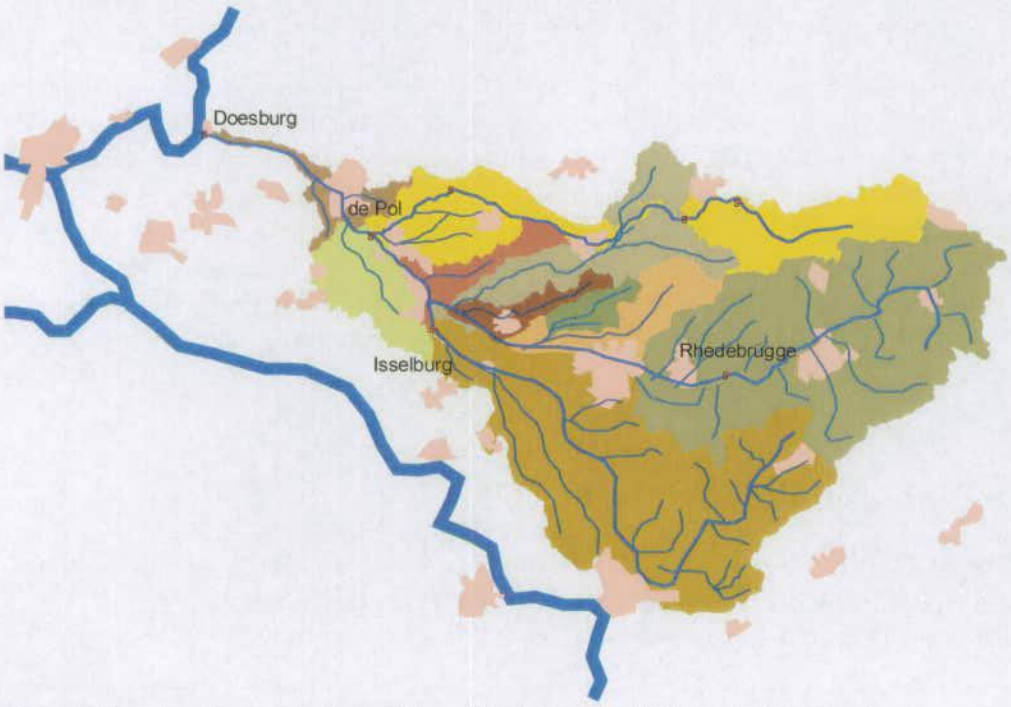
Afvoerstation	Beschikbare gegevens
Stuw de Pol	vanaf 01-01-1994 t/m 31-12-1998 uurwaarden vanaf 01-01-1999 t/m 31-12-2001 dagwaarden (ontbrekend 29feb1996, 31dec1996, 3-8jan1997, 4-17mrt1997, 31dec1997, 22-27mei2001, plus her der ontbrekende waarden)
Isselburg	vanaf 01-01-1993 t/m 31-12-2003 uurwaarden
Rhedebrugge	vanaf 01-01-1993 t/m 31-12-2003 uurwaarden (ontbrekend 31jul2003 t/m 6aug2003)

Tabel 2-4: Beschikbare afvoergegvens.

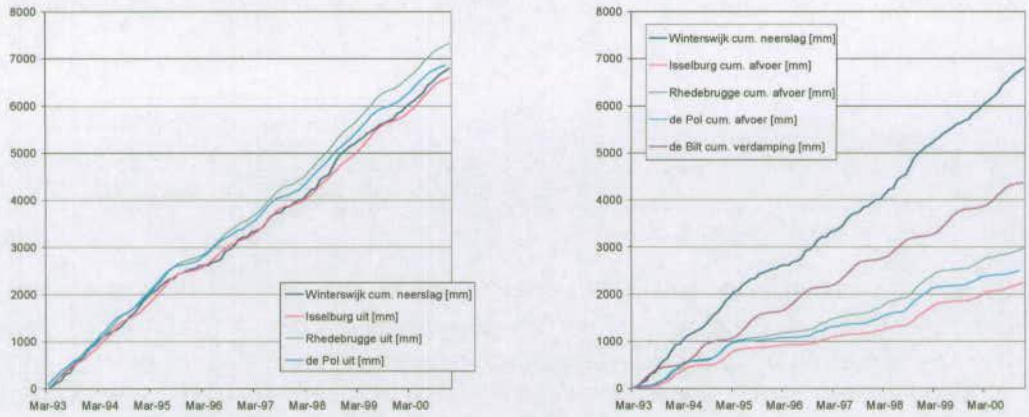
Per jaar voert de Oude IJssel gemiddeld 170 miljoen m3 water af. De gemiddelde afvoer van de Oude IJssel bij stuw de Pol bedraagt circa 4 m3/s (Stolker, 1999). Het fysisch maximum van de Oude IJssel bedraagt 180 m3/s (bron: WRIJ). Boven deze afvoer inundeert een groot gedeelte van het stroomgebied waardoor de afvoer afvlakt. De hoogste waarde gemeten in de jaren 1994 tot en met 1998 is 141 m3/s bij meetpunt de Pol (bron: WRIJ). In de jaren 1990 tot 2000 is de laagste gemeten afvoer bij Isselburg 0,1 m3/s, het gemiddelde is gelijk aan 2 m3/s en de hoogste gemeten afvoer bedraagt 23 m3/s (bron: St. U. Herten). Voor deze jaren is de laagste

gemeten afvoer bij Rhedebrügge 0,5 m3/s, het gemiddelde is 3 m3/s en de hoogste waarde is gelijk aan 43 m3/s (bron: St. U. Herten).

Afvoer- en verdampingsgegevens worden over het algemeen getoetst m.b.v. een waterbalans. Achter meetpunt de Pol ligt 96.146 ha stroomgebied, achter meetpunt Isselburg ligt 25.816 ha en achter Rhedebrügge ligt 24.204 ha. De afvoer in mm/dag wordt verkregen door het gemeten debiet (in m3/s) te delen door dit oppervlak en te vermenigvuldigen met 60x60x24/10 seconden. Deze afvoerreeksen in mm/dag zijn onderling vergelijkbaar en zijn te vergelijken met neerslag- en verdampingsreeksen (ook in mm/dag). In Figuur 2-6a is het cumulatieve verloop van de som van afvoer en verdamping uitgezet. In de figuur is ook het cumulatieve verloop van de neerslag te Winterswijk weergeven. Om dat afvoergegevens van 1993 ontbreken, is de afvoerreeks van de Pol voor 1993 aangevuld met het gemiddelde van Isselburg en Rhedebrügge.



Figuur 2-5: Locatie van de afvoerstations in het stroomgebied van de Oude IJssel.

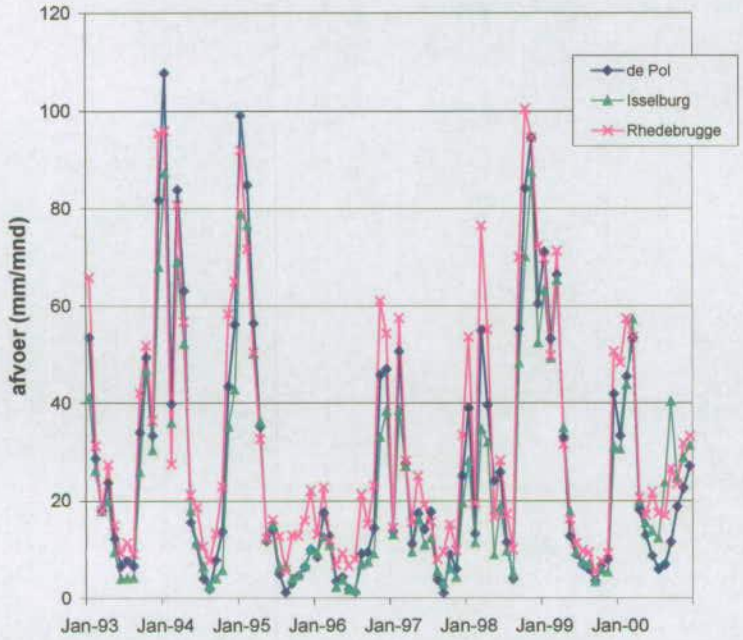


(a) cumulatief verloop waterbalans (b) cumulatief verloop posten op waterbalans

Figuur 2-6: Validatie van daggegevens afvoer met behulp van een waterbalans.

Uit de figuur blijkt dat de in-term en de uit-term van de waterbalans min of meer overeenkomen. De som van de verdamping en de afvoer bij Isselburg komen overeen met de neerslag. De som van de verdamping en de afvoer bij Rhedebrügge is groter dan de neerslag. De som van de verdamping en de afvoer bij de Pol is ook groter dan de neerslag. Deze verschillen kunnen ontstaan, doordat de gebruikte verdamping (KNMI station de Bilt) niet overeenkomt met de werkelijke verdamping. Voor deze toets is de referentie gewasverdamping gebruikt. In werkelijkheid zal de werkelijke verdamping in droge jaren als 1995, 1996 en 1997 kleiner zijn dan de referentie verdamping als gevolg van vochttekort in de bodem. De verschillen kunnen ook ontstaan doordat de gebruikte neerslag (KNMI station Winterswijk) niet overeenkomt met de werkelijke gebiedsneerslag en als gevolg van neerslagspreiding zal de werkelijke gebiedsneerslag afwijken. Ten derde kunnen deze verschillen ontstaan door fouten in de meting van de afvoer, de verdamping en de neerslag.

In Figuur 2-6b is het cumulatieve verloop van de neerslag, verdamping, en afvoer bij de Pol, Isselburg en Rhedebrügge weergegeven. Rhedebrügge voert relatief veel neerslag af. Dit meetpunt ligt middenin het hellende deel van het stroomgebied van de Bocholter Aa. Uit de figuur blijkt dat bij Isselburg minder neerslag tot afvoer komt. Dit kan een gevolg zijn van het bodemgebruik, grondsoort en de helling in het gebied. Op grond van de beschikbare gegevens is dit niet specifieker te analyseren. Bij de Pol komt min of meer een gemiddelde hoeveelheid neerslag tot afvoer, een gemiddelde van Isselburg en Rhedebrügge.

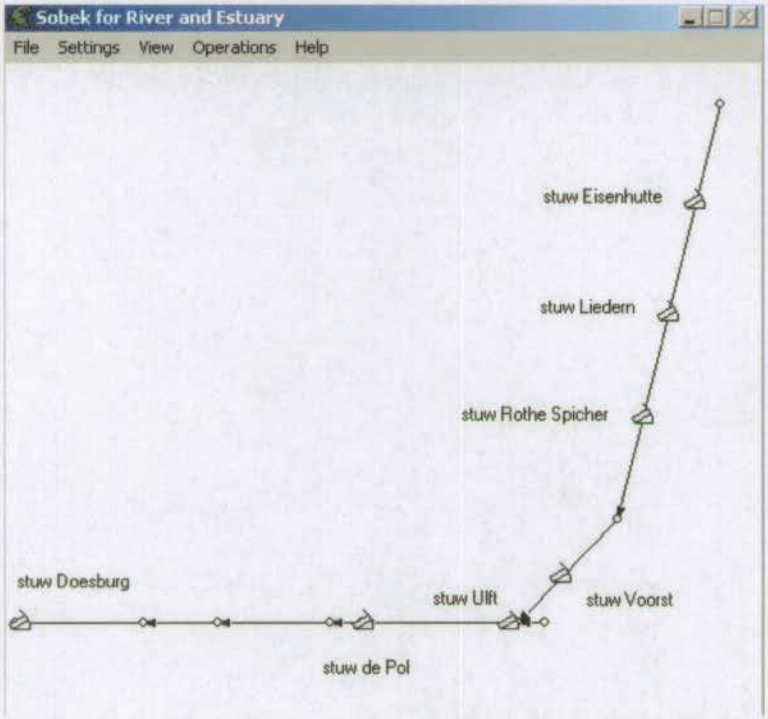


Figuur 2-7: Verloop van de afvoer op de locatie stuw de Pol, Isselburg en Rhedebrügge.

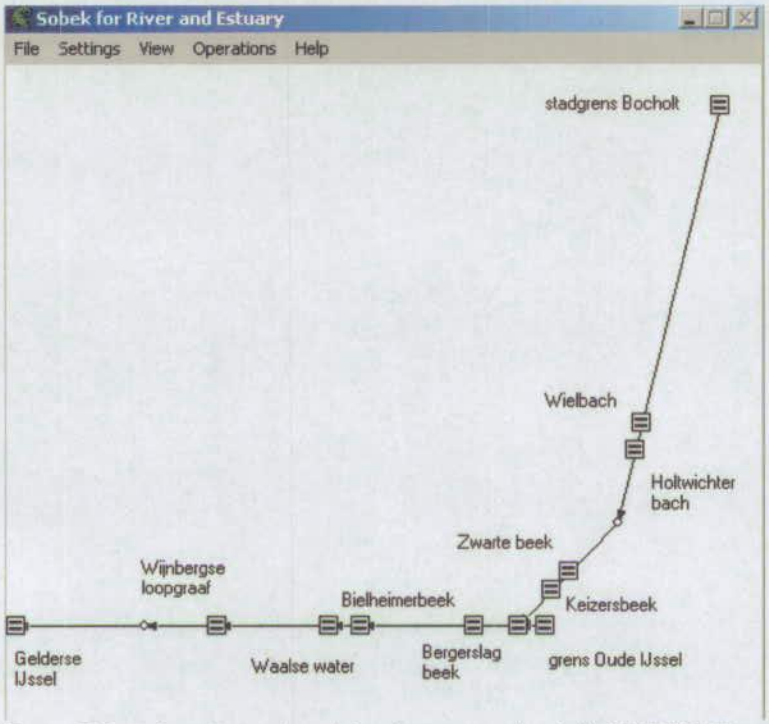
Het verloop van de afvoer op de locaties Stuw de Pol, Isselburg en Rhebrugge hebben een vergelijkbaar verloop gedurende 1993 tot en met 2000. Uit Figuur 2-7 blijkt dat de afvoer gedurende het jaar sterk varieert. In de natte winters is de afvoer meer dan 80 mm per maand. In de zomer nadert de afvoer tot nul millimeter. In de winter van 1994 en 1995 komt bij de Pol meer neerslag tot afvoer dan bij Rhedebrügge en Isselburg. In de andere winters is de afvoer bij de Pol geringer dan bij Rhedebrügge en groter dan bij Isselburg.

2.5 Hydraulische modellering Oude IJssel en Rijntakken

Door het waterschap Rijn en IJssel is een SOBEK-RE model van de Oude IJssel toegeleverd. Voor een beschrijving van het model wordt verwezen naar Snippen (1997) en Stolker (1999). Ter illustratie zijn op de volgende bladzijde twee figuren afgedrukt, die een indruk van het model geven. De afvoer bij stuw de Pol is de belangrijkste variabele waar het Sacramento neerslag-afvoer model op afgeregeld wordt. Benedenstrooms van stuw Doesburg mondt de Oude IJssel uit in de Gelderse IJssel. Bovenstrooms van stuw Ulft zijn twee takken geschematiseerde, de Issel (in Figuur 2-8 de kleine tak) en de Bocholter Aa (de grote tak in de figuur). Bij randvoorwaarde 'grens Oude IJssel' wordt het debiet van de Issel als functie van de tijd opgelegd. Bij randvoorwaarde 'stadgrens Bocholt' wordt het debiet van de Bocholter Aa ter plaatse opgelegd. Een QH-relatie is bij randvoorwaarde Gelderse IJssel opgelegd. De laterale voorwaarden zijn tijdreeksen van debieten van de deelstroomgebieden zoals ze in zijn Figuur 2-1 weergegeven.

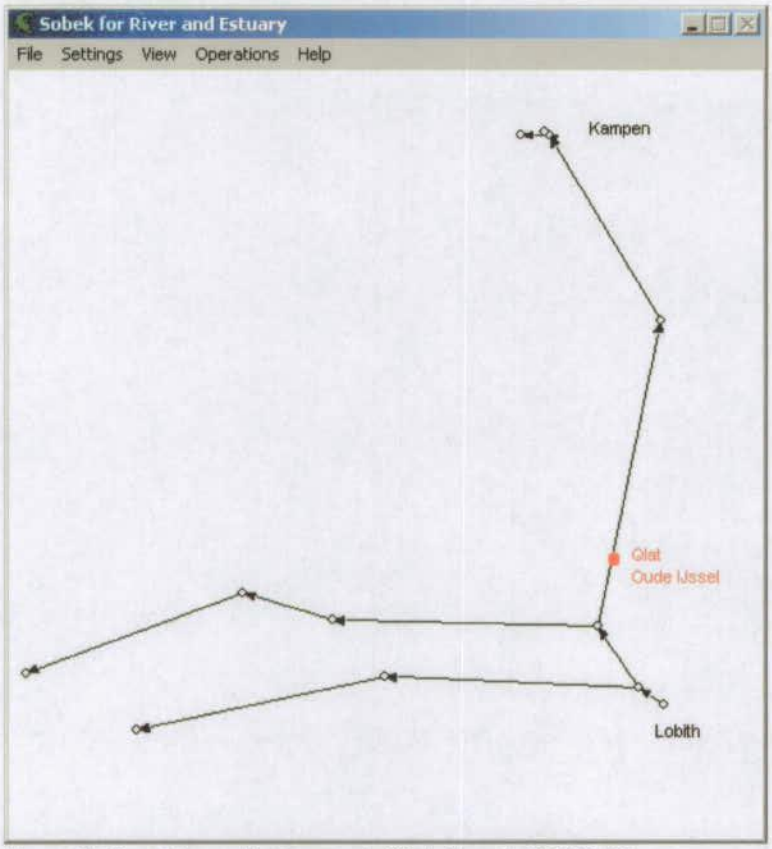


Figuur 2-8: Locatie van kunstwerken in het SOBEK-RE model van het stroomgebied van de Oude IJssel.



Figuur 2-9: Locatie rand- en laterale voorwaarden in het SOBEK-RE model van het stroomgebied van de Oude IJssel.

In deze studie wordt het door het RIZA ontwikkelde SOBEK-RE model van de Rijntakken, SOBEK-model Rijn 2000_3, gebruikt. In Figuur 2-10 is de schematisatie van dit model weergegeven. Voor een beschrijving van het model wordt verwezen naar RIZA (2002a). De afvoer die als randvoorwaarde bij Lobith wordt opgelegd bepaaldt in belangrijke mate de berekeningsresultaten van het model. In het Rijntakken model is de Oude IJssel als een laterale voorwaarde van de Gelderse IJssel geschematiseerd. In de onderhavige studie wordt onderzocht hoe deze laterale voorwaarde er uit ziet onder maatgevende condities.



Figuur 2-10: Schematisatie van de Rijntakken in SOBEK-RE.

3 Modellering Oude IJssel

3.1 Inleiding

Voor de Oude IJssel geldt dat te weinig afvoergegevens beschikbaar zijn om de optredende afvoeren bij de maatgevende afvoer in Lobith vast te stellen. Met behulp van de beschikbare neerslaggegevens, de oppervlakten van de deelstroomgebieden en afvoermetingen van de Pol, Isselburg en Rhedebrügge is een eenvoudig neerslag-afvoermodel van de Oude IJssel ontwikkeld. Met dit neerslag-afvoermodel en de hydraulische modellering van Oude IJssel en Rijnktakken kan een homogene afvoerreeks worden gegenereerd op basis waarvan uitspraken kunnen worden gedaan over de samenhang van de afvoer van de Oude IJssel en hoogwaters op de Rijn. Het neerslag-afvoermodel en de koppeling van dit neerslag-afvoermodel aan de hydraulische modellering van de Oude IJssel en de Rijntakken, wordt in dit hoofdstuk beschreven.

In paragraaf 3.2 wordt het neerslag-afvoermodel van het stroomgebied van de Oude IJssel beschreven. De koppeling van het neerslag-afvoermodel aan de hydraulische modellering van de Oude IJssel staat in paragraaf 3.3. De koppeling van deze modellering aan de hydraulische modellering van de Rijntakken staat in paragraaf 3.4. De nauwkeurigheid van de berekening van de afvoer op de Oude IJssel staat beschreven in paragraaf 3.3.

3.2 Neerslag-afvoermodellering Oude IJssel

Ten behoeve van de neerslag-afvoermodellering van het stroomgebied van de Oude IJssel is gekozen voor een conceptueel 'lumped' model, namelijk het Sacramento model. De reden om hiervoor te kiezen is dat het model toepasbaar is voor stroomgebieden waarvan weinig gegevens bekend zijn en waarvoor niet veel meer ruimtelijk detail wordt gevraagd dan de afvoer op enkele locaties. Sacramento is beschikbaar binnen de in Nederland bekende en veel gebruikte software pakketten HYMOS en SOBEK-Rural. In deze studie is Sacramento binnen SOBEK-Rural gebruikt.

3.2.1 Beknopte beschrijving van Sacramento

Zonder volledig te willen zijn volgt hier een beknopte beschrijving van de belangrijkste eigenschappen van het Sacramento-model. Voor een meer volledige beschrijving wordt verwezen naar de HYMOS of SOBEK-RR handleiding.

Het neerslag-afvoerproces wordt in het Sacramento model geschematiseerd middels een aantal reservoirs die de snel reagerende onverzadigde zone ('upper zone') en het traag reagerende grondwater ('lower zone') representeren. Het trage grondwatersysteem is daarbij onderverdeeld in twee reservoirs, ieder met hun eigen reactiesnelheid. In Tabel 3-1 staan de parameters die in model moeten worden opgegeven. De parameters zijn ingedeeld in drie groepen, namelijk oppervlak, upperzone en lowerzone. Zowel de upper- als de lowerzone is onderverdeeld in een deel dat freathisch water kan bergen en een deel dat capillair water bevat.

Het deel van de neerslag dat op verharde oppervlakken (parameters PCTIM en ADIMP) valt verdampt, of komt direct tot afstroming. Het deel van de neerslag dat op het onverharde

oppervlak valt infiltreert naar de onverzadigde zone, tenzij de neerslagintensiteit groter is dan de infiltratie-capaciteit of de onverzadigde zone verzadigd raakt, in welk geval sprake is van oppervlakkige afstroming. De bergingscapaciteit van de onverzadigde zone wordt bepaald door de parameters UZTWM en UZFWM. De drainage weerstand van de toplaag is met parameter UZK op te geven. De directe en oppervlakkige afstroming zijn de snelle componenten in het neerslag-afvoerproces . Het deel van het water dat niet verdampt uit de onverzadigde zone of via oppervlakte afstroming tot afvoer komt, percoleert naar het grondwater. De percolatie in het model kan afgeregeld worden met drie parameters. De parameters ZPERC en REXP beïnvloeden de doorlatendheid van de bodem. De parameter PFREE geeft aan dat de bodem niet verzadigd hoeft te zijn, voordat percolatie optreedt.

parameter	eenheid	beschrijving
oppervlak		
Surface	ha	oppervlak van het stroomgebied
PCTIM	%/total	permanent ondoorlaatbare fractie van het stroomgebied
ADIMP	%/total	tijdelijk ondoorlaatbare fractie van het stroomgebied
SARVA	%/total	open water fractie van het stroomgebied
upperzone		
UZTWM	mm	verschil in vochthoeveelheid tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt
UZTWC	mm	initiële vochthoeveelheid
UZFWM	mm	verschil in vochthoeveelheid tussen veldcapaciteit en verzadiging
UZFWC	mm	initiële vochthoeveelheid
UZK	1/dag	drainage weerstand toplaag
PBASE		hulp parameter
ZPERC		percolatie factor (proportionele toename percolatie)
REXP		percolatie exponent (bepaalt verandering percolatievraag van droog naar nat)
PFREE	%	fractie van water dat direct naar het vrije water percoleerd
Lowerzone		
LZTWM	mm	verschil in vochthoeveelheid tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt
LZTWC	mm	initiële vochthoeveelheid
RSERV	%	fractie van het vrije water dat niet beschikbaar is voor transpiratie
LZFWSM	mm	verschil in vochthoeveelheid tussen veldcapaciteit en verzadiging (bovenste laag)
LZFWSC	mm	initiële vochthoeveelheid (bovenste laag)
LZSK	1/dag	drainageweerstand snelreagerende component (bovenste laag)
LZFWPM	mm	verschil in vochthoeveelheid tussen veldcapaciteit en verzadiging (onderste laag)
LZFWPC	mm	initiële vochthoeveelheid (onderste laag)
LZPK	1/dag	drainageweerstand traagreagerende component (onderste laag)
SIDE	%	fraction of baseflow not observed in the streams
SSOUT	%	sub-surface outflow

Tabel 3-1: Parameters die in het Sacramento model moeten worden opgegeven.

Het deel van het grondwater dat niet via het wortelstelsel van planten en bomen verdampt, vormt de basisafvoer van het stroomgebied. De basisafvoer kan worden afgeregeld met 11 parameters. De belangrijkste daarvan zijn de parameters die de bergingscapaciteit en de drainage weerstand van de lowerzone bepalen, namelijk LZTWM, LZFWSM, LZFWPM, LZSK en LZPK. Als de bodem uitdroogt zal de capillaire nalevering afnemen. De nalevering neemt evenredig af met de afstand tussen de wortelzone en de grondwaterspiegel. Een gedeelte van

het grondwater is dan ook niet beschikbaar voor transpiratie (RSERV). Aanvullend biedt Sacramento nog de mogelijkheid om wegzijging (SSOUT en SIDE) te modelleren.

3.2.2 Schematisatie van het stroomgebied in Sacramento

De belangrijkste vraag in de schematisatie van het model is in hoeverre onderscheid gemaakt moet worden in deelstroomgebieden, ieder met een eigen neerslag-afvoerrelatie. Dit wordt bepaald door:

- Beschikbare afvoerreeksen om het model te ijken.
- De ruimtelijke variatie van gebiedskenmerken zoals bodemsoort, landgebruik, percentage openwater, hoogteligging (grondwatertrappen) en neerslag. Binnen een deelstroomgebied dat als zodanig geschematiseerd wordt, moeten de gebiedskenmerken min of meer homogeen zijn.

Op grond van de beschikbare metingen en de beschikbare gebiedsgegevens van het Duitse gedeelte van het stroomgebeid is gekozen om voor het stroomgebied van de Oude IJssel drie neerslag-afvoer relaties af te leiden:

1. een neerslag-afvoer relatie geijkt op metingen bij stuw de Pol;
2. een neerslag-afvoer relatie geijkt op metingen bij Isselburg en
3. een neerslag-afvoer relatie geijkt op metingen bij Rhedebrügge.

De ligging van De Pol, Isselburg en Rhedebrügge is weergeven in onderstaande figuur.

Figuur 3-1: Ligging van Doesburg, de Pol, Isselburg en Rhedebrügge.

De relatie geijkt op stuw de Pol geeft het gemiddelde gedrag van het stroomgebied weer. De relaties geijkt op Isselburg en Rhedebrügge geeft het gedrag van gebieden met een relatief groot hoogte verschil (50 m) weer.

3.2.3 Kalibratie en verificatie van het neerslag-afvoermodel

Een eerste schatting van de waarden van de belangrijkste parameters kan worden verkregen op basis van globale gegevens over bodemtype en landgebruik (zie ook Armstrong,1978). In Tabel 3-6 is een schatting gemaakt van de bandbreedte van de waarde van de parameters.

De bergingscapaciteit van de bodem is afgeleid van de bergingcoëfficiënt (ThetaS) en het vochtgehalte bij verwelkingspunt (ThetaW) en veldcapaciteit (ThetaP). Op basis van de Staringreeks (Wösten, 2001) voor boven- en ondergronden is een schatting gemaakt van ThetaS, ThetaW en ThetaP. Vervolgens is de dikte (d) van de diverse lagen in de bodem van belang. De maximale dikte van de upperzone en lowerzone te zamen wordt geschat op ongeveer 7 m. Het stroomgebied de Oude IJssel heeft een hoogteverschil van ongeveer 50 m. De maximale dikte van de upperzone wordt geschat op ruim anderhalve meter. De lowerzone bedraagt dan ongeveer 6 m, onderverdeeld in 1/3 snel reagerend en 2/3 traag reagerend.

parameter	eenheid	berekening	bandbreedte
oppervlak			
Surface	ha	toegeleverd door waterschap Rijn en IJssel	
PCTIM	%/total	9% stedelijk (5-15%) waarvan 40% verhard	[0.02-0.06]
ADIMP	%/total	handleiding SOBEK-RR	[0.00 - 0.10]
SARVA	%/total	3% open water	[0.01 - 0.05]
upperzone			
UZTWM	mm	d=0-1.5 m; ThetaW=0.030-0.050; ThetaP=0.25-0.30	[0-405]
UZTWC	mm		[0-405]
UZFWM	mm	d=0-2.0 m; ThetaP=0.25-0.30; ThetaS=0.40-0.45	[0-400]
UZFWC	mm		[0-400]
UZK	1/dag	KS = 10-50 cm/d	[0.1 - 1.0]
PBASE		(LZFPM*LZPK + LZFSM*LZSK)	
ZPERC		(LZTWM+LZFSM+LZFPM-PBASE)/PBASE	
REXP		handleiding SOBEK-RR	[1.0 - 3.0]
PFREE	%	handleiding SOBEK-RR	[0.20 - 0.40]
lowerzone			
LZTWM	mm	d=0.5-5 m; ThetaW=0.10-0.22; ThetaP=0.13-0.22	[0-600]
LZTWC	mm		[0-600]
RSERV	%	handleiding SOBEK-RR	[0.0 - 0.40]
LZFWSM	mm	d=0.5-2 m; ThetaP=0.13-0.22; ThetaS=0.32-0.37	[50-480]
LZFWSC	mm		[50-480]
LZSK	1/dag	KS = 15-50 cm/d	[0.05 - 0.10]
LZFWPM	mm	d=1-3.5 m; ThetaP=0.13-0.22; ThetaS=0.32-0.37	[100-840]
LZFWPC	mm		[100-840]
LZPK	1/dag	KS = 15-50 cm/d	[0.001 - 0.05]
SIDE	%		[0-0]
SSOUT	%		[0-0]

Tabel 3-2: Initiële schatting van de Sacramento parameters.

De fijne ijking van de parameters geschiedt door middel van wiskundige optimalisatie. Er is gekozen om de set parameters UZTWM, UZFWM, UZK, LZTWM, LZFSWM, LZSK, LZFPWM, LZPK en REXP af te regelen. Bij het afregelen van deze set parameters is het Simplex algoritme van

Nelder en Mead (Press 1992, Visser 2001 en Wijbenga 1998) gebruikt. Deze techniek is al eerder door HKV toegepast bij het afregelen van SOBEK-RE en WAQUA schematisaties (HKV 1999, HKV 2000 en HKV 2001). Initiëel worden willekeurig 10 alternatieve parameter sets gegenereerd. Iedere iteratieslag in het optimalisatie proces worden de 10 alternatieve sets geëvalueerd. Vervolgens wordt de slechtste set aangepast in de richting van de beste set. De kwalificatie van slechtste en beste is gebaseerd op het verschil tussen meting en simulatie resultaat. Het optimalisatie proces is zo opgezet dat de parameters binnen de bandbreedte van Tabel 3-3 moeten blijven. Om een lokaal optimum te omzeilen is er voor gekozen om 5 keer de optimalisatie uit te voeren. De eerste optimalisatie wordt begonnen met 10 willekeurige parameters sets. De andere optimalisaties worden begonnen met 9 willekeurige sets en de beste set van de vorige optimalisatie.

De waarde van de overige parameters is gekozen op basis van ervaring (Tabel 3-6).

parameter	eenheid	waarde
PCTIM	%/total	5
ADIMP	%/total	0
SARVA	%/total	3
PFREE	%	10
RSERV	%	10
SIDE	%	0
SSOUT	%	0

Tabel 3-3: Gekozen waarde van de Sacramento parameters.

Het Sacramento model is geijkt op op basis van uurgegevens van de afvoer op de locaties Rhedebrügge, Isselburg en stuw de Pol voor de jaren van 1993 tot en met 2000. De ijking van het Sacramento model is uitgevoerd op basis van 12 afvoergolven uit de jaren 1993 tot en met 2000. Met het Sacramento model wordt in één berekening de periode 1 januari 1990 tot en 31 december 2001 doorgerekend. Hierdoor kan de invloed van de beginvoorwaarden op het kalibratie resultaat worden verwaarloosd. Vervolgens wordt voor de 12 kalibratie perioden het verschil tussen de simulatie en de metingen berekend. Op basis van dit verschil worden de parameters aangepast.

Als invoer van de neerslag-afvoerberekening zijn de volgende gegevens gebruikt:

- De verdamping volgt uit daggegevens van het KNMI station in de Bilt.
- De neerslag volgt uit de daggegevens van het KNMI station in Winterswijk.

Het resultaat van de kalibratie- en verificatieprocedure wordt beschreven in bijlage A en B.

3.3 Hydraulische modellering Oude IJssel

3.3.1 Koppeling van neerslag-afvoermodel aan hydraulisch model

Door het waterschap Rijn en IJssel is een SOBEK-RE model van de Oude IJssel toegeleverd (paragraaf 2.5). Rand- en laterale debietvoorwaarden van dit model worden in deze studie door het neerslag-afvoermodel berekend. Bij de koppeling van het neerslag-afvoermodel aan het hydraulische model is het stroomgebied van de Oude IJsel ingedeeld in 10 deelgebieden. In de schematisatie monden de waterlopen in deze deelgebieden uit in de Oude IJssel via de rand- of

laterale voorwaarden. In Figuur 3-2 is te zien waar de stroomgebieden aan het SOBEK-RE model worden gekoppeld. Er zijn drie deelstroomgebieden die benedenstrooms van stuw de Pol in de Oude IJssel uitkomen, namelijk de Bielheimerbeek (3), het WaalseWater (7) en de Wijnbergseloop-graaf (9). In Tabel 3-7 is weergegeven welke neerslag-afvoer relatie is gebruikt om het laterale debiet van het deelstroomgebied te berekenen. Behalve de deelstroomgebieden, BocholterAa (2) en Oude IJssel (6), wordt voor alle deelstroomgebieden de neerslag-afvoer relatie van stuw de Pol gebruikt. Voor deelstroomgebied de Bocholter Aa (2) wordt de neerslag-afvoer relatie van Rhedebrügge gebruikt en de neerslag-afvoer relatie van Isselburg wordt gebruikt voor de Oude IJssel (6).

Figuur 3-2: Deelstroomgebieden die als rand- of laterale voorwaarden aan het SOBEK-RE model van Oude IJssel worden opgelegd.

Nummer	Deelstroomgebied	Oppervlak (ha)	Neerslag-afvoer relatie
1	Bergerslagbeek	3.021	meetpunt Stuw de Pol
2	BocholterAa	35.493	meetpunt Rhedebrugge
3	Bielheimerbeek	17.107	meetpunt Stuw de Pol
4	Holtwicherbach	5.563	meetpunt Stuw de Pol
5	Keizersbeek	9.720	meetpunt Stuw de Pol
6	OudeIJssel	36.318	meetpunt Isselburg
7	WaalseWater	5.959	meetpunt Stuw de Pol
8	Wielbach	1.850	meetpunt Stuw de Pol
9	Wijnbergseloopgraaf	3.246	meetpunt Stuw de Pol
10	ZwarteBeek	2.584	meetpunt Stuw de Pol

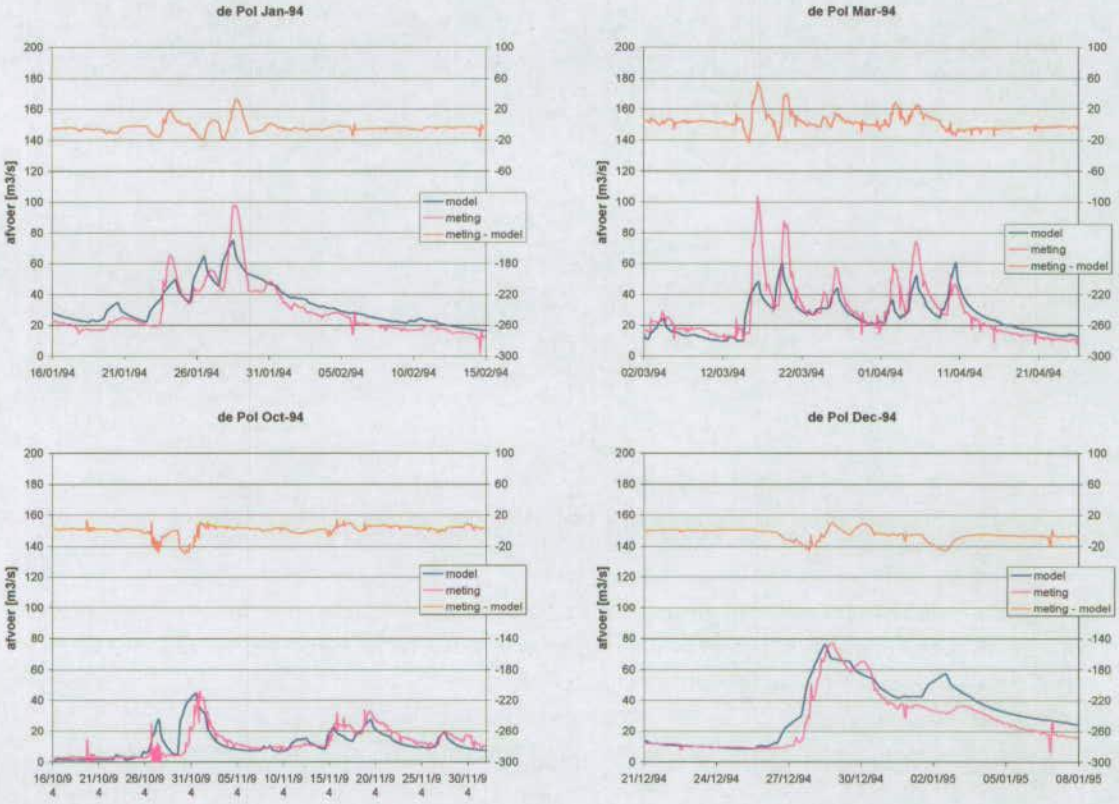
Tabel 3-4: Koppeling laterale instroompunten Sobek-RE en neerslag-afvoerrelatie Sacramento.

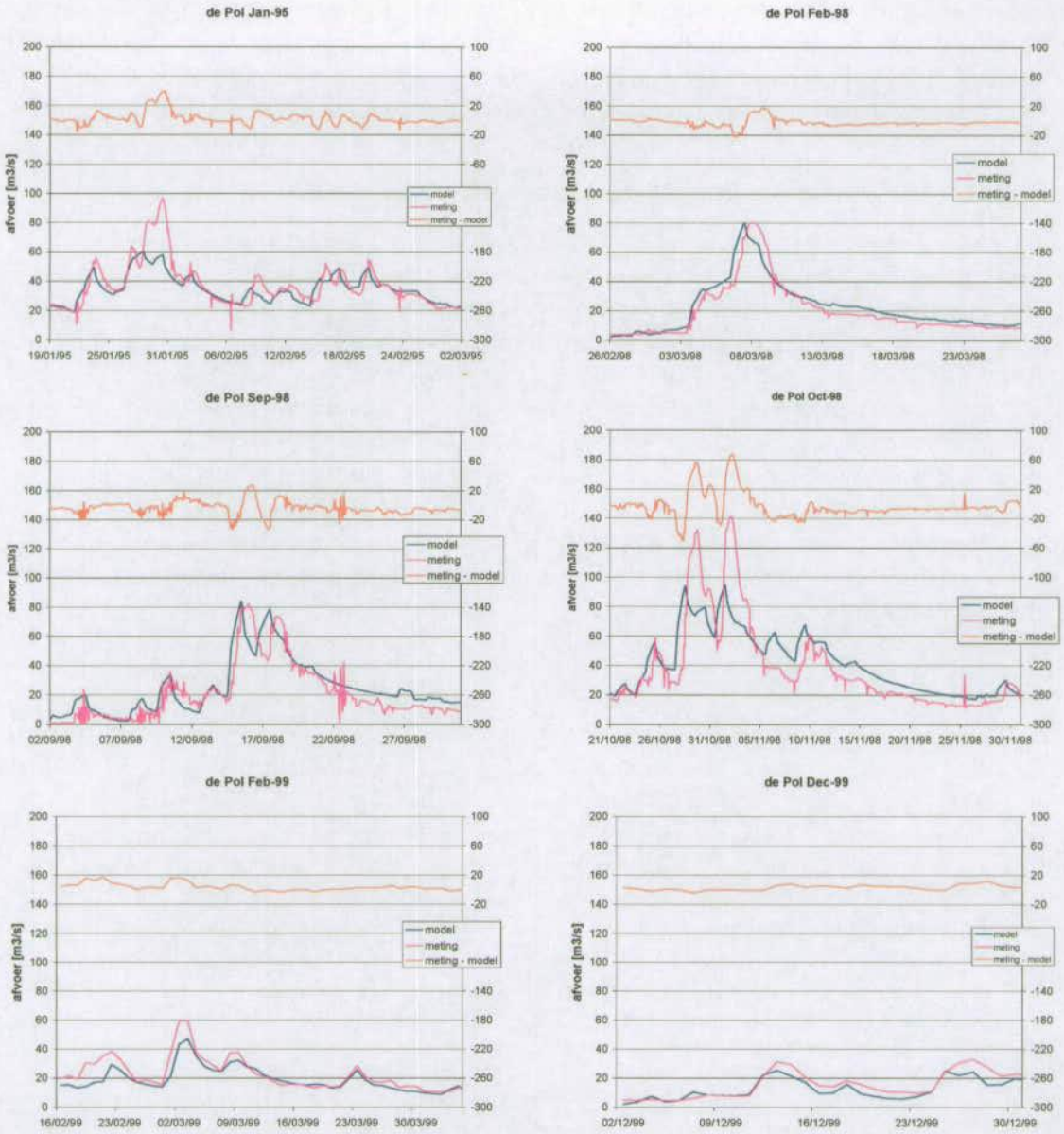
De koppeling werkt als volgt. Met Sacramento wordt een periode doorgerekend. Deze berekening levert drie afvoerreeksen op, namelijk afvoer stuw de Pol, afvoer Isselburg en afvoer Rhedebrügge. Deze afvoerreeksen zijn omgerekend naar rand- en laterale voorwaarden door de

reeksen te delen door het oppervlak achter het meetpunt en te vermenigvuldigen met het oppervlak van het deelstroomgebied. De looptijden binnen de geschematiseerde deelstroomgebieden zijn gelijk aan orde een halve dag of kleiner. Omdat de neerslag informatie op dagbasis beschikbaar is, zijn de looptijden binnen de deelstroomgebieden verwaarloosd.

3.3.2 Verificatie afvoer Oude IJssel bij stuw de Pol

Met het Sobek-RE model zijn de 12 afvoergolven uit de jaren 1993 tot en met 2000 gesimuleerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van de afvoer die berekend is met het Sacramento model (neerslag Winterswijk). Met Sacramento is de periode januari 1990 tot en met december 2001 door gerekend. Deze berekening levert drie afvoerreeksen op, namelijk afvoer stuw de Pol, afvoer Isselburg en afvoer Rhedebrügge. Deze afvoerreeksen zijn omgerekend naar rand- en laterale voorwaarden voor de SOBEK-RE berekeningen. De resultaten van deze berekeningen zijn getoetst op de locatie Stuw de Pol (Figuur 3-3). Voor de perioden in 1999 zijn daggemiddelde waarden van de afvoer bij stuw de Pol gebruikt. Voor de overige perioden zijn uurwaarden gebruikt. Uit Figuur 3-3 blijkt dat de timing van de afvoergolven en het recessieverloop (de val) van de golf op de Oude IJssel goed door het model wordt gereproduceerd. Het niveau van de top van de golf wordt in de perioden Jan94, Mar94, Jan95, Oct98 en Feb99 onderschat.



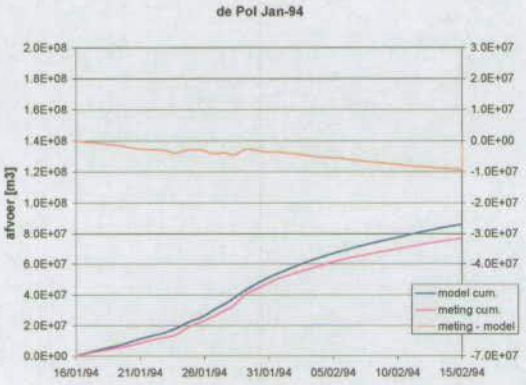


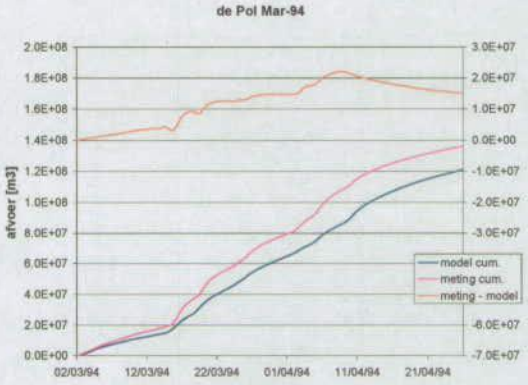
Figuur 3-3: Toetsing afvoerverloop van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 10 hoogwater perioden.

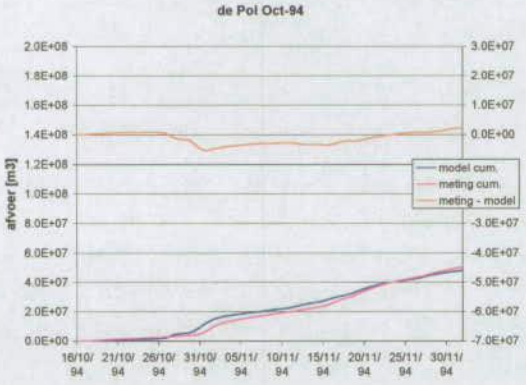
In Figuur 3-4 is het cumulatieve verloop van de afvoer in de kalibratieperioden uitgezet. Uit de figuur blijkt dat in de simulaties het afvoerverloop redelijk wordt gevolgd. In de perioden Mar94, Jan95 en Feb99 wordt het afgevoerde volume onderschat. In deze perioden wordt de topafvoer onderschat. In de perioden Jan94, Sep98 en Oct98 wordt het afgevoerde volume overschat. In deze perioden is de gesimuleerde val van de golf minder stijl dan in de meting.

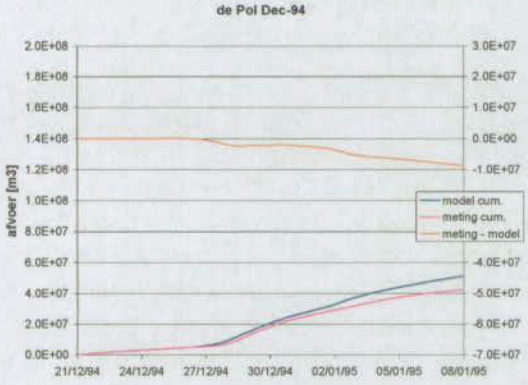
Uit bijlage A blijkt dat de topafvoer door het Sacramento model op locatie Isselburg wordt overschat en op de locaties de Pol en Rhedebrügge in een aantal perioden wordt onderschat. De fout van het Sacramento model op locaties de Pol en Rhedebrügge zet zich door in het SOBEK-RE model. Uit de kalibratie overzichten in de figuren A-1, A-3 en A-4 in bijlage A blijkt dat er weinig rek zit in deze kalibratieresultaten. Verondersteld wordt dat door het gebruik van dagwaarden van neerslag de topafvoeren worden onderschat. Uit de figuren A-2, A-4 en A-6 blijkt dat het stroomgebied van de Oude IJssel in de wintermaanden binnen een dag reageert

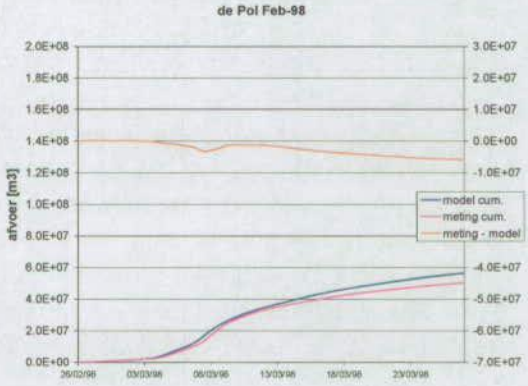
op neerslag. De belangrijkste aanpassing om de kalibratie resultaten te verbeteren zal dan ook verbetering van de modelinvoer zijn. Indien uurwaarden van de neerslag worden gebruikt, zal de maximale neerslag per uur in hoogwater perioden groter zijn. Dit heeft tot gevolg dat ook de gesimuleerde uurwaarden van de afvoer groter zullen zijn. Omdat de honderdjarige neerslagreeks waarmee de jaarmaxima en de hoogwater perioden op de Gelderse IJssel worden gesimuleerd uit dagwaarden bestaat, geeft dit verificatie resultaat een juiste inschatting van de nauwkeurigheid van het model zoals het in deze studie wordt gebruikt.

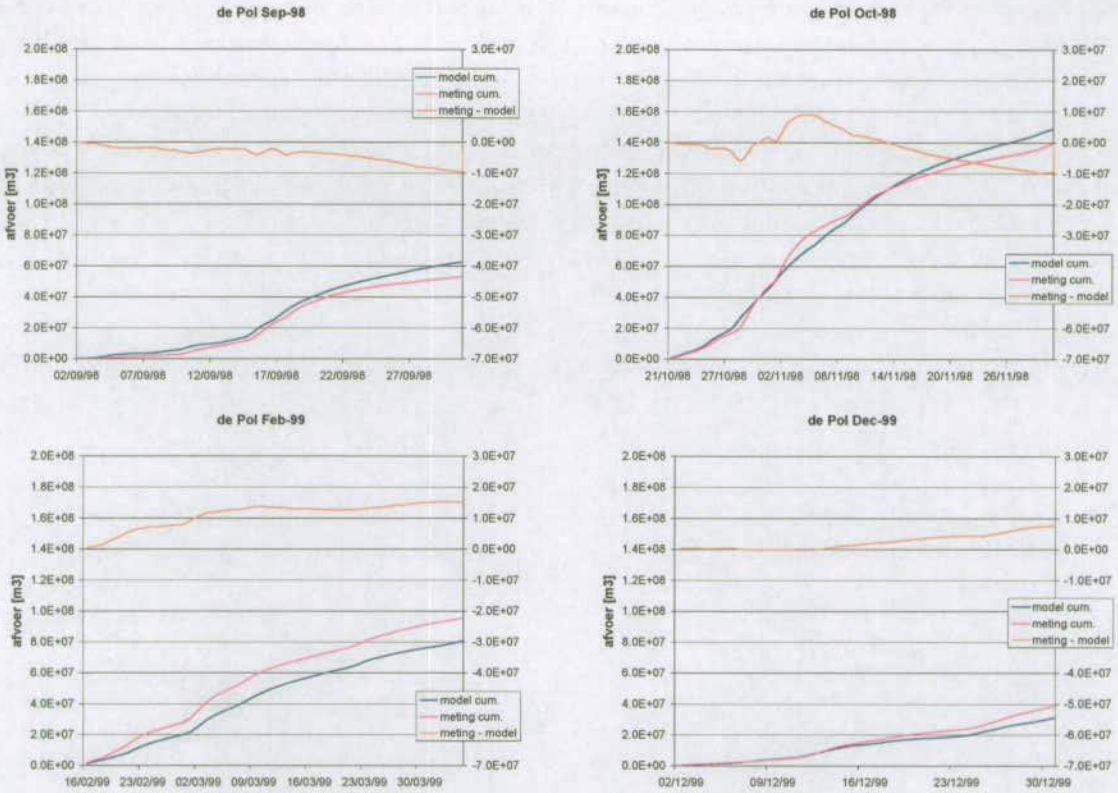












Figuur 3-4: Toetsing cumulatief afvoerverloop van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 10 hoogwater perioden.

In Tabel 3-10 staan de waarden van het volume (Vgolf), de grootte van de top (Qtop) en het moment van de top van de golf van de simulatie en de metingen. Het volume van de golf is som van de afvoer in kubieke meters over de gehele simulatie periode berekend, Qtop, de top afvoer, is gelijk gesteld aan de maximale uurafvoer in de simulatie periode. Het tijdstip waarop dit maximum optreedt, is het moment van de top (Ttop). De gemiddelde afvoer tussen 72 en 96 uur na de top is gedefinieerd als de gemiddelde dagafvoer 3 dagen na de top (Qdag top + 3d). De gemiddelde afvoer tussen 96 en 120 uur na de top is gedefinieerd als de gemiddelde dagafvoer 4 dagen na de top (Qdag top + 4d). Voor de berekening van de gemiddelde dagafvoer 3 en 4 dagen is het tijdstip van de top van in meting gebruikt.

De meeste gesimuleerde perioden kennen een gering verschil in volume van de golf. Als een te klein volume wordt gesimuleerd, dan wordt voornamelijk veroorzaakt door een te lage top van de golf. Het gemiddelde verschil in volume van de golf tussen meting en model is kleiner dan een procent. Dit verschil varieert tussen –30 en +22 procent. Ongeveer de helft van de topafvoeren wordt 20 tot 40%. te laag gesimuleerd. Zoals hiervoor al beschreven, wordt dit met name veroorzaakt door het gebruikt van dagwaarden voor de neerslag. Gemiddeld zijn de topafvoeren 18 procent te laag. Dit gemiddelde wordt geheel veroorzaakt door de zes te lage afvoergolven. Het verschil tussen de metingen en het model in grootte van de afvoertop varieert tussen –42 en +2 procent. Bij de meeste afvoergolven is het verschil in het moment van de top gering. Daar waar het verschil groter is (Mrt94, Jan95 en Dec99) wordt dit veroorzaakt door dat de afvoergolf twee of meer toppen kent. Gemiddeld wordt het moment van de top enkele uren tot een halve dag te vroeg berekend.

De gemiddelde afvoer op 3 en 4 dagen na de top wordt berekend, omdat verwacht wordt dat de top van de afvoergolf op de Oude IJssel Doesburg passeert ongeveer 3-4 dagen voor de top op de Gelderse IJssel. Omdat deze afvoer meestal gering is (ten opzichte van de topafvoer) is het procentuele verschil tussen meting en model groot. Grootte fouten worden gemaakt bij periode Dec94 en Okt98. De periode Dec94 kent een tweede top die in de metingen niet terug te zien is. In Okt98 is de gesimuleerde afvoergolf in zijn geheel breder dan de gemeten. Het verschil in afvoer 3-4 dagen na de top varieert tussen +60 en -40 procent. Gemiddeld is het verschil hierdoor kleiner dan 10%. Echter in ongeveer de helft van de perioden is het verschil meer 20 procent.

Periode	Criteria		Meting	Model	Verschil
Jan94	Vgolf	[m3]	7.68E+07	8.62E+07	12%
	Qtop	[m3/s]	97.76	74.91	-23%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	28/01/94 13:00	28/01/94 12:00	-1 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	35.27	40.52	15%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	32.01	37.54	17%
Mrt94	Vgolf	[m3]	1.40E+08	1.26E+08	-10%
	Qtop	[m3/s]	103.76	60.44	-42%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	16/03/94 09:00	19/03/94 12:00	+75 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	79.58	49.69	-38%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	48.96	36.31	-26%
Okt94	Vgolf	[m3]	5.22E+07	4.93E+07	-5%
	Qtop	[m3/s]	45.88	44.43	-3%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	31/10/94 23:00	31/10/94 11:00	-12 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	12.27	8.93	-27%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	11.06	7.97	-28%
Dec94	Vgolf	[m3]	4.36E+07	5.31E+07	22%
	Qtop	[m3/s]	76.97	76.09	-1%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	28/12/94 19:00	28/12/94 12:00	-7 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	35.56	43.77	23%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	32.63	53.71	65%
Jan95	Vgolf	[m3]	1.41E+08	1.33E+08	-6%
	Qtop	[m3/s]	96.88	60.68	-37%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	30/01/95 10:00	28/01/95 12:00	-46 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	43.36	38.84	-10%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	34.18	33.08	-3%
Feb98	Vgolf	[m3]	5.39E+07	6.01E+07	12%
	Qtop	[m3/s]	80.43	79.98	-1%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	08/03/98 00:00	07/03/98 12:00	-12 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	28.03	29.56	5%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	23.20	26.36	14%
Sep98	Vgolf	[m3]	5.31E+07	6.27E+07	18%
	Qtop	[m3/s]	82.11	83.95	2%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	15/09/98 23:00	15/09/98 12:00	-11 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	38.69	41.37	7%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	34.72	37.57	8%

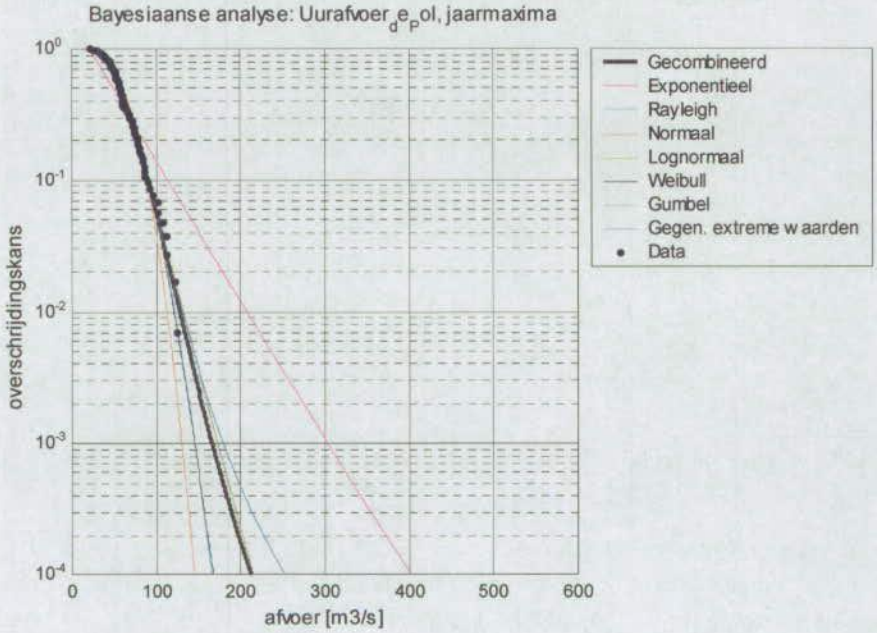
Periode	Criteria		Meting	Model	Verschil
Okt98	Vgolf	[m3]	1.39E+08	1.49E+08	7%
	Qtop	[m3/s]	141.28	94.79	-33%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	02/11/98 03:00	01/11/98 12:00	-15 uur
	Qdag top + 3d	[m3/s]	40.40	52.66	30%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	38.26	58.00	52%
Feb99	Vgolf	[m3]	1.14E+08	8.12E+07	-29%
	Qtop	[m3/s]	59.69	46.97	-21%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	03/03/99	03/03/99	+0 dag
	Qdag top + 3d	[m3/s]	28.68	25.23	-12%
	Qdag top + 4d	[m3/s]	24.87	24.45	-2%
Dec99	Vgolf	[m3]	3.98E+07	3.19E+07	-20%
	Qtop	[m3/s]	32.84	25.10	-24%
	Ttop	[dd/mm/yy hh:mm]	27/12/99	13/12/99	-14 dag
	Qdag top + 3d*	[m3/s]	14.97	9.30	-38%
	Qdag top + 4d*	[m3/s]	14.15	9.61	-32%

Tabel 3-5: Toetsing volume, top debiet en timing top van afvoergolven van het Sobek-RE model van de Oude IJssel gedurende 12 hoogwater perioden.

3.3.3 Verificatie herhalingstijden afvoer bij stuw de Pol

Met het geijkte en geverifieerde neerslag-afvoermodel van de Oude IJssel is de volledige neerslagreeks op dagbasis met een lengte van 100 jaar doorgerekend. Op basis van de berekende afvoeren is per jaar een periode geselecteerd met het jaarmaximum van de afvoer op de Oude IJssel. Deze perioden zijn doorgerekend met het hydraulische model van de Oude IJssel. Per periode is het maximale debiet over stuw de Pol vastgesteld. Op basis van de gegenereerde afvoer van de Oude IJssel bij stuw de Pol is met behulp van het computerprogramma 'BAYES' (Noortwijk et. al., 2001 en Noortwijk et al., 2004) de geschikte frequentieverdeling van de topafvoeren met herhalingstijden van 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250 en 1250 jaar vastgesteld. Dit computerprogramma gebruikt Bayesiaanse rekentechnieken om extreme waarden verdelingen vast te stellen (Chbab, 2002). Het programma stelt vast welke kansdichtheid het beste bij de gegevens past.

In de figuur op de volgende pagina is het resultaat van de Bayesiaanse analyse weergegeven voor jaarmaxima van de uurafvoer bij Stuw de Pol.



Figuur 3-5: Baysiaanse analyse van de frequentieverdeling van de jaarmaxima van uurafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol.

Uit de analyse blijkt dat de Gumbel verdeling het best op de data past. In Tabel 3-13 is de uurafvoer bij de herhalingstijden 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250 en 1250 jaar gegeven.

Herhalingstijd [jaar]	Uurafvoer stuw de Pol [m3/s]
1	51
2	65
5	81
10	91
25	104
50	112
100	120
150	124
250	129
1250	144

Tabel 3-6: Uurafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol bij herhalingstijden 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250 en 1250 jaar.

De gemiddelde dagafvoeren bij stuw de Pol behorende bij de herhalingstijden van 1 en 100 jaar kunnen worden getoetst aan de verwachtingswaarden zoals die bekend zijn bij het waterschap Rijn en IJssel. De verwachtingswaarde van de daggemiddelde afvoer bij de herhalingstijd van 1 jaar stelt het waterschap gelijk aan de ontwerpafvoer van 0,67 l/s ha. De afvoer bij herhalingstijd 100 jaar wordt gelijk verondersteld aan 2 maal de afvoer bij herhalingstijd 1 jaar. Ook voor gemiddelde dagafvoeren is een bayesiaanse analyse uitgevoerd, het resultaat staat in Tabel 3-7.

Herhalingstijd [jaar]	Dagafvoer Ws Rijn & IJssel [m3/s]	Dagafvoer berekend [m3/s]	Afvoer gecorrigeerd [m3/s]
1	63	46	54
2		58	68
5		72	85
10		82	96
25		92	109
50		100	118
100	126	107	126
150		110	130
250		115	135
1250		128	151

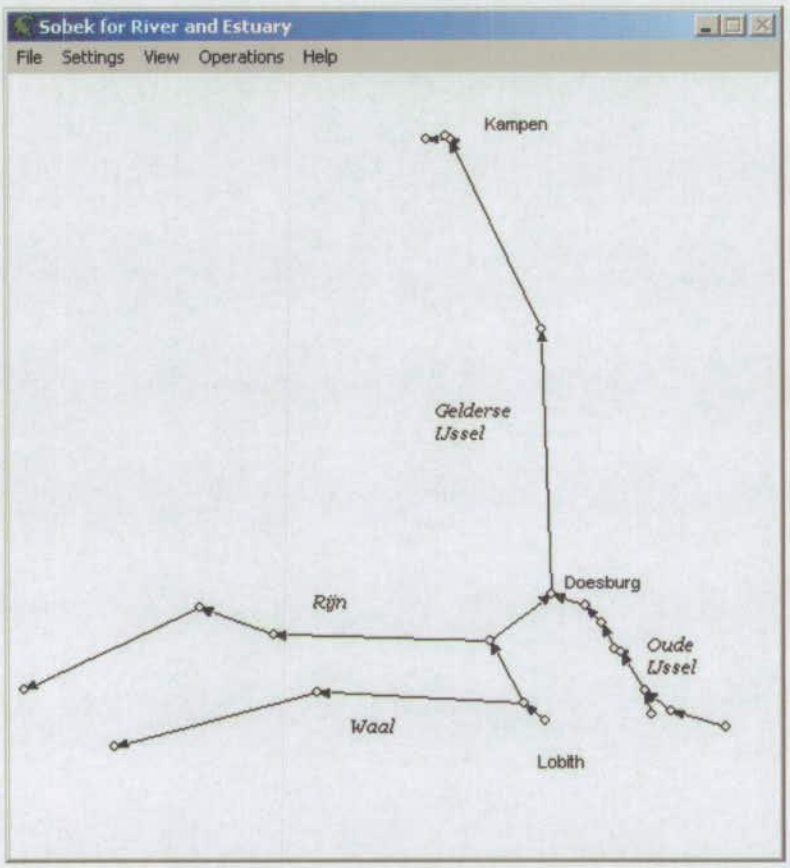
Tabel 3-7: Gemiddelde dagafvoeren bij meetpunt Stuw de Pol bij herhalingstijden 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250 en 1250 jaar.

Bij de ijking van de modellering van het stroomgebied van de Oude IJsel is aangegeven dat de topafvoer door het gekoppelde model de helft van de topafvoeren met 20-40% onderschreden (paragraaf 3.3.2). Als de berekende, gemiddelde dagafvoeren worden gecorrigeerd voor een gemiddelde onderschatting van 18%, komt het resultaat van de berekeningen in de buurt van de waarden van het waterschap. Het lijkt dus juist om de berekende waarden te corrigeren. Echter, de herhalingstijden van het waterschap zijn gebaseerd op ontwerpeisen en niet op metingen. Het waterschap heeft aangegeven dat het fysisch afvoermaximum van de Oude IJssel gelijk is aan 180 m3/s. Het kan zijn dat de Oude IJssel of de beken die in de Oude IJssel uitmonden bij deze afvoer buiten zijn/hun oevers treden. In de berekeningen is het niet voorgekomen dat de afvoer op Oude IJssel bij Doesburg hoger is dan 180 m3/s. Deze 180 m3/s wordt ook niet overschreden als de uurafvoeren met 18 procent worden gecorrigeerd.

Op basis van de berekeningen met het SOBEK-RE model van de Oude IJssel kan een goede schatting gemaakt worden van de afvoeren van de Oude IJssel bij stuw de Pol bij verschillende herhalingstijden. Hiervoor moeten de berekeningsresultaten echter wel worden gecorrigeerd voor een gemiddelde modelfout. Deze fout bedraagt -18 procent voor de topafvoer en +10 procent voor de afvoer op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel Doesburg passeert.

3.4 Koppeling van Oude IJssel aan het Rijntakken model

Het SOBEK-RE model van de Oude IJssel is gekoppeld aan het SOBEK-RE model van de Rijntakken (paragraaf 2.5). Met dit gekoppelde model van Rijntakken en Oude IJssel wordt de analyse van de afvoer op de Oude IJssel uitgevoerd. Voor het gekoppelde model is het Rijntakken model het basis model. Hier is het Oude IJssel model in geplaatst (Figuur 3-6). Ter plaatse van Yssel__1_18337, het instroompunt van de Oude IJssel, is in het Rijntakken model een knoop aangebracht. Op deze locatie is eveneens een geïnterpoleerd profiel van de Gelderse IJssel gelegd. Tenslotte is het eindpunt van de Oude IJssel op deze knoop gelegd.



Figuur 3-6: Schematisatie van de Rijntakken en Oude IJssel in SOBEK-RE.

Een korte berekening is uitgevoerd met het model van de Oude IJssel (2002/01/01;00:00:00 tot 2002/01/10;23:00:00). Dezelfde periode is doorgerekend met het gekoppelde model. De afvoer op de Oude IJssel ter hoogte van de instroming van de Oude IJssel in de Gelderse IJssel is vergeleken. Het verloop van de waterstand boven en beneden stuw Doesburg is geanalyseerd. Deze stuw staat 300 m bovenstrooms van het instroompunt van de Oude IJssel. Het afvoerverloop is nagenoeg gelijk (maximaal 0,5 m3/s verschil) voor beide modellen.
De waterstand benedenstrooms van de stuw Doesburg verschilt sterk. Dit komt omdat de waterstand in het gekoppelde model de waterstand in de Gelderse IJssel volgt. De waterstand berekend met het model van de Oude IJssel is bepaald door een Qh-relatie.
Bovenstrooms van de stuw is de waterstand gelijk voor beide modellen. Dit betekent dat als de stuw bij Doesburg niet gestreken is en de waterstand op de Gelderse IJssel relatief laag is, het effect van de Gelderse IJssel als benedenstroomse rand niet bovenstrooms van de stuw doordringt. Voor hoge afvoeren van de Oude IJssel moet gekeken worden of de stuw Doesburg gestreken wordt. In dat geval heeft de waterstand een gering op de IJssel effect op de Oude IJssel. Dit effect is in Bijlage D beschreven.

4 Analyse afvoer Oude IJssel

4.1 Inleiding

De maatgevende hoogwaterstanden op de Rijntakken worden met name veroorzaakt door de afvoer bij Lobith. Zonder een extreme afvoer bij Lobith ontstaat geen hoogwater op de Gelderse IJssel. De afvoer van de Oude IJssel tijdens een dergelijke hoogwater periode heeft echter een niet te verwaarlozen invloed op de waterstanden. Een beschrijving van het verloop van de afvoer van de Oude IJssel gegeven een extreem afvoerverloop bij Lobith is het doel van dit rapport. In dit hoofdstuk wordt het verloop van de afvoer van de Oude IJssel gedurende perioden met een hoge afvoer op de Rijn geanalyseerd. Voor maatgevende condities op de Rijntakken is gezocht naar een relatie tussen de afvoer op de Oude IJssel en de afvoer op de Rijn. Geanalyseerd is de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg, waar de Oude IJssel in de Gelderse IJssel uit komt. De afvoer bij Doesburg is berekend met het gekoppelde SOBEK-RE model van de Rijntakken en de Oude IJssel (paragraaf 3.4). De volgende rand- en laterale voorwaarden zijn in de berekeningen opgelegd:

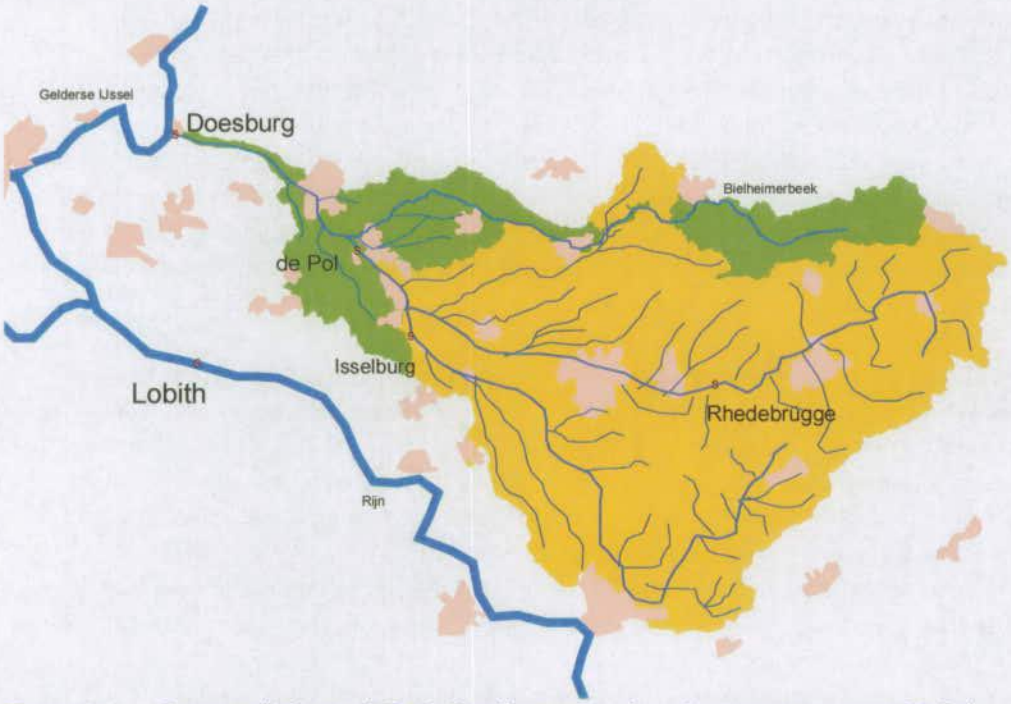
- Voor de afvoer bij Lobith wordt uitgegaan van afvoerperioden van 30 dagen rondom elk hydrologisch jaarmaximum in de periode 1901-2000. De afvoer in deze 99 perioden is ontleend aan DONAR en heeft een tijdstap van 24 uur.
- De afvoer bij Rhedebrügge en Isselburg gedurende de periode van het hydrologische jaarmaximum te Lobith, is berekend met het gekalibreerde neerslag-afvoermodel voor respectievelijk Rhedebrügge en Isselburg (paragraaf 3.1).
- De afvoer van de laterale takken tussen Rhedebrügge/Isselburg en de monding van de Oude IJssel bij Doesburg zijn berekend met het gekalibreerde neerslag-afvoermodel voor de Pol (paragraaf 3.1).
- In de neerslag-afvoerberekening is uitgegaan van de neerslag bij Winterswijk.

Bijlage C bevat de resultaten van de berekeningen van het gekoppelde SOBEK-RE model bij de Pol en bij Doesburg. De modellering van de Oude IJssel is getoetst op de berekende afvoer bij stuw de Pol. Allereerst wordt in paragraaf 4.2 aangegeven in welke mate de afvoer bij de monding van de Oude IJssel in de Gelderse IJssel (te Doesburg) verschilt van de afvoer bij stuw de Pol. In paragraaf 4.3 wordt de relatie tussen de afvoer op de Rijn bij Lobith en de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg onderzocht. In paragraaf 4.4 volgt een statistische beschouwing van de afvoer op Oude IJssel in perioden van het hydrologische jaarmaximum te Lobith. Tenslotte volgt in paragraaf 4.5 een beschrijving van uitgangspunten voor het vaststellen van de afvoer op de Oude IJssel voor RVW2006.

4.2 Relatie afvoer Oude IJssel de Pol - Doesburg

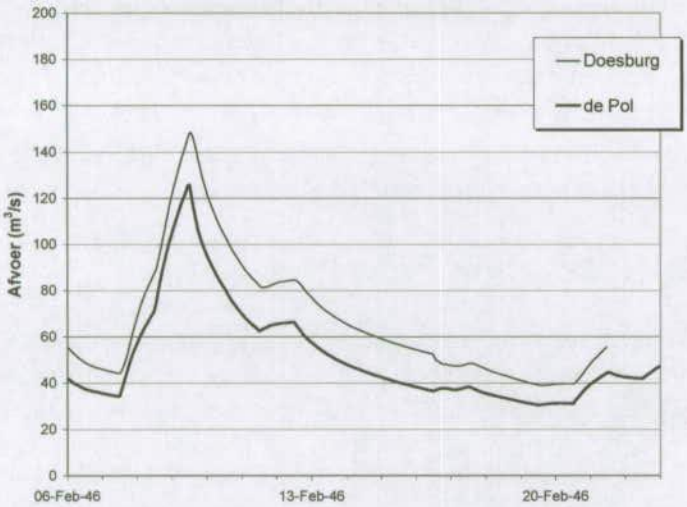
Het neerslag-afvoer model van de Oude IJssel is getoetst voor de afvoer bij de Pol. Voor het bepalen van de relatie tussen de afvoer op de Rijn bij Lobith en de afvoer van de Oude IJssel bij de monding op de Gelderse IJssel, wordt in deze paragraaf eerst beschreven in welke mate het verloop van de afvoer bij de monding te Doesburg afwijkt van het verloop van de afvoer bij de Pol.

Benedenstrooms van stuw de Pol komt de neerslag van ongeveer 21 procent van het stroomgebied van de Oude IJssel (121.000 ha) tot afvoer. In Figuur 4-1 is het gedeelte van het stroomgebied aangegeven dat benedenstrooms van de stuw tot afvoer komt. De grootste beek die benedenstrooms van de Pol in de Oude IJssel uit komt is de Bielheimerbeek (stroomgebied 17.000 ha). De afvoer van deze beek is door een retentiebekken begrensd tot 12 m3/s. In de modellering van de laterale voorwaarde van de Bielheimerbeek is hier rekening meegehouden. Indien de afvoer van de beek groter wordt dan 12 m3/s loopt het reservoir vol. Zodra de afvoer onder 12 m3/s komt, wordt het reservoir geleegd.



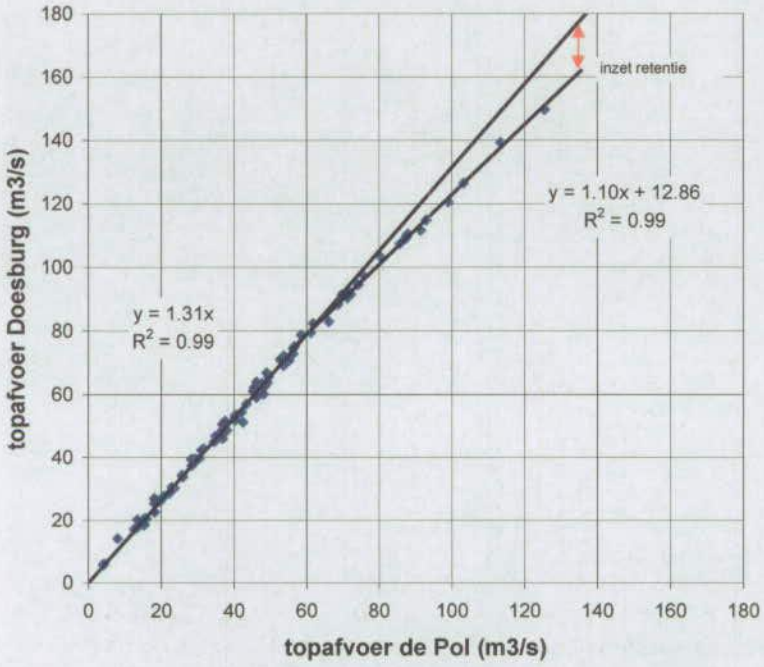
Figuur 4-1: Stroomgebied van de Oude IJssel boven- en benedenstrooms van stuw De Pol.

De afvoergolf op de Oude IJssel bij Doesburg is groter en treedt iets later op dan de afvoergolf bij de Pol. In de onderstaande figuur is ter illustratie de afvoer bij de Pol en Doesburg uitgezet voor het hoogwater van februari 1946.



Figuur 4-2: Verloop van de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en De Pol, hoogwater 1946.

Als voor de 99 perioden van het jaarmaximum te Lobith de topafvoer bij de Pol wordt vergeleken met de topafvoer bij Doesburg ontstaat de volgende relatie.



Figuur 4-3: Relatie tussen de topafvoer op de Oude IJssel bij de Pol en Doesburg.

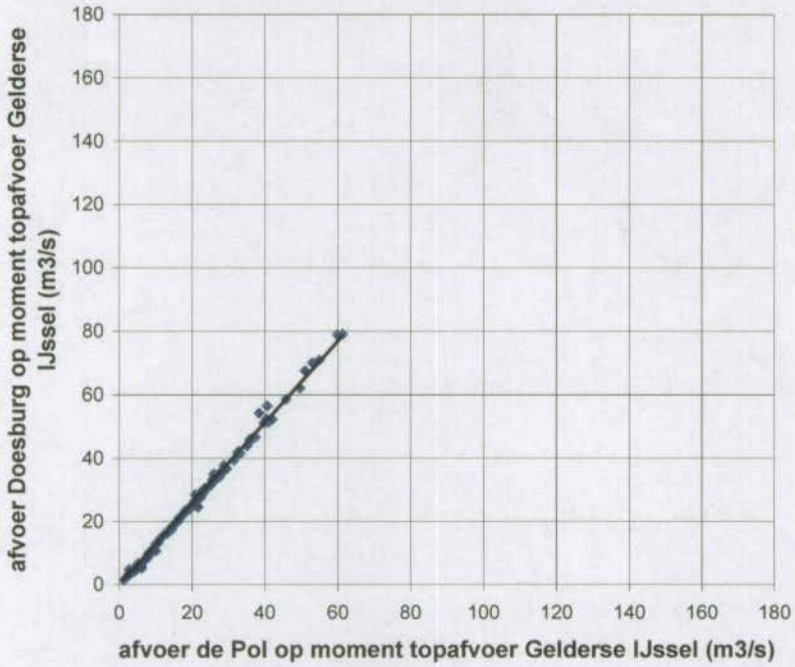
In de figuur is te zien dat als de topafvoer bij de Pol kleiner is dan 65 m3/s, de topafvoer bij Doesburg ongeveer 30% groter is. Dit recht evenredige verband wordt deels veroorzaakt door de eigenschappen van het stroomgebied van de Oude IJssel en deels door de opzet van de berekeningen. In de berekeningen wordt de gebiedsneerslag uniform verondersteld. In het extreme bereik is het verschil in topafvoer geringer als gevolg van de inzet van het retentiebekken langs de Bielheimerbeek. In het extreme bereik is de topafvoer bij Doesburg ongeveer 10 procent plus 12 m3/s groter dan de topafvoer bij de Pol. De inzet van het retentiebekken levert een reductie van de topafvoer bij Doesburg met 15 m3/s bij een topafvoer van 130 m3/s bij de Pol. In deze berekeningen is geen rekening gehouden met het maximale volume dat in het retentiebekken kan worden geborgen. Omdat het bekken gevuld raakt, zal de reductie van de topafvoer in het extreme bereik geringer zijn dan berekend.

Naast de topafvoer is ook de afvoer op de Oude IJssel op het moment dat het afvoermaximum op de Gelderse IJssel Doesburg passeert van belang. De inzet van het retentiebekken kan de afvoer op het moment van passeren op drie wijze beïnvloeden:

- De afvoer wordt verkleind, omdat de afvoer op de Bielheimerbeek op het moment van passeren groter is dan 12 m3/s.
- De afvoer wordt vergroot, omdat het bekken wordt geleegd op het moment van passeren.
- De afvoer verandert niet, omdat het bekken reeds is geleegd op het moment van passeren.

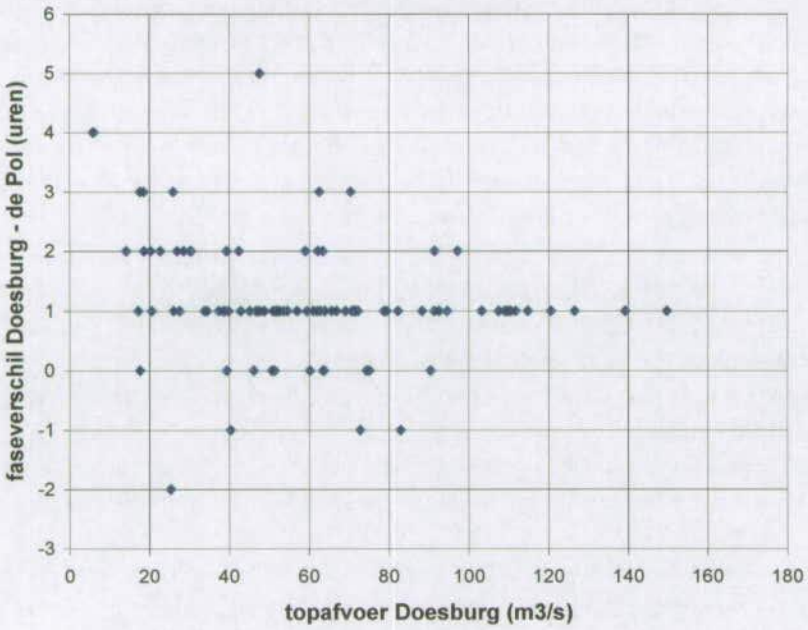
De afvoer bij Doesburg is ongeveer 28% groter dan de afvoer bij de Pol op het moment van passeren (Figuur 4-4). Uit de regressieanalyse is gebleken dat de relatie tussen de afvoer bij Doesburg en de Pol op het moment van passeren niet afwijkt in het extreme bereik. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de inzet van het retentiebekken de afvoer op de Oude

IJssel gedurende het passeren van de topafvoer op de Gelderse IJssel niet of nauwelijks beïnvloedt. In paragraaf 4.2 bij de behandeling van de samenhang tussen de afvoergolf op de Rijntakken en de afvoergolf op de Oude IJssel wordt dit aspect nader besproken.



Figuur 4-4: Relatie afvoer Oude IJssel de Pol – Doesburg tijdens afvoermaximum op de Gelderse IJssel.

Er is geen correlatie tussen de topafvoer van de Oude IJssel bij Doesburg en het faseverschil tussen Doesburg en de Pol (Figuur 4-5). Gemiddeld zit er ruim een uur tussen het moment dat de topafvoer op de Oude IJssel de Pol passeert en bij Doesburg arriveert.



Figuur 4-5: Faseverschil afvoer Oude IJssel de Pol – Doesburg tijdens afvoermaximum op de Rijn.

De relatie tussen het afvoermaximum op de Oude IJssel bij de Pol en Doesburg kan als volgt worden samengevat:

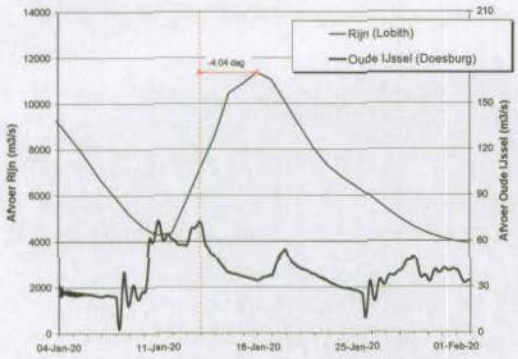
- In het extreme bereik is de topafvoer bij Doesburg ongeveer 10 procent plus 12 m3/s groter dan de topafvoer bij de Pol.
- Zonder inzet van het retentiebekken langs de Bielheimerbeek is de topafvoer bij Doesburg ongeveer 30 procent groter dan de topafvoer bij de Pol.
- De afvoer bij Doesburg is ongeveer 28% groter dan de afvoer bij de Pol op het moment dat het afvoermaximum op de Gelderse IJssel Doesburg passeert.
- De inzet van het retentiebekken beïnvloedt de afvoer op de Oude IJssel gedurende het passeren van de topafvoer op de Gelderse IJssel niet of nauwelijks.
- Tot slot zij vermeld dat uit bijlage D blijkt dat het afvoerverloop van de Oude IJssel nauwelijks wordt beïnvloed door het afvoerverloop op de Gelderse IJssel.

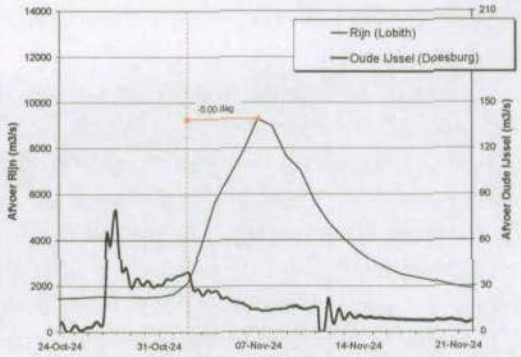
4.3 Relatie afvoer Rijn (Lobith) en Oude IJssel (Doesburg)

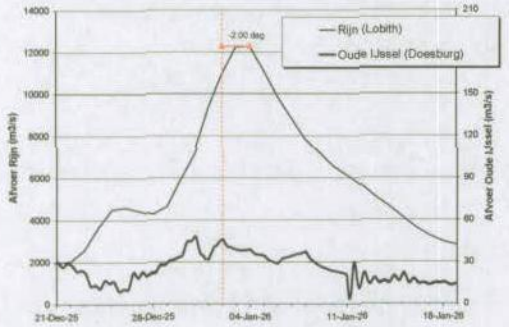
4.3.1 Samenhang afvoergolf Rijn en Oude IJssel

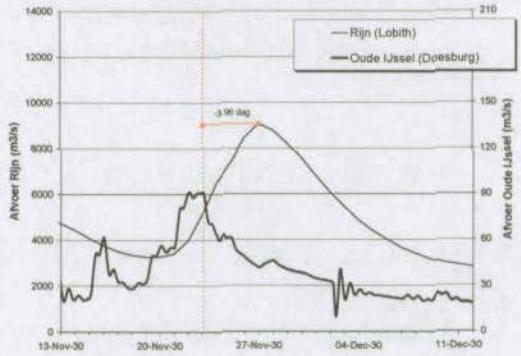
In deze paragraaf wordt de samenhang van de afvoergolven op de Rijn bij Lobith en de Oude IJssel bij Doesburg beschreven. Onderzocht is welke afvoer op de Oude IJssel kan voorkomen, gegeven een hydrologisch jaarmaximum op de Rijntakken. Indicatief wordt in de onderstaande figuren het verloop van de afvoer van de Rijn bij Lobith en de Oude IJssel bij Doesburg weergegeven voor perioden, waarbij de topafvoer in Lobith minimaal 8000 m3/s bedraagt. Bij deze afvoer op Rijn loopt het winterbed van de Rijntakken vol. Met twee lijnen wordt de tijd tussen de topafvoer op de Oude IJssel en de topafvoer op de Rijn aangegeven.

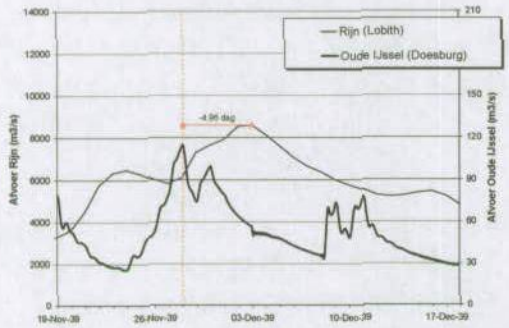
In de figuren is te zien dat op het moment dat tijdens het optreden van het jaarmaximum bij Lobith de afvoer van de Oude IJssel gering kan zijn (bijv. maart 1942) of een extreme waarde kan bereiken (bijv. februari 1946). Meerdere afvoergolven passeren Doesburg (bijv. januari 1948) of de afvoer van de Oude IJssel concentreert zich in 1 golf (bijv. februari 1984). Het maximum van de afvoergolf op de Oude IJssel in een periode van het jaarmaximum bij Lobith bedraagt 60 +/- 31 m3/s. De gemiddelde afvoer van de Oude IJssel op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel optreedt bedraagt 29 +/- 18 m3/s. In alle 99 beschouwde perioden treedt de afvoergolf van de Oude IJssel eerder op dan de afvoergolf van de Rijn (bijlage C). Het gemiddelde faseverschil tussen de topafvoeren bedraagt 3 dagen en 23 uren. Dit faseverschil varieert tussen 2,5 en 5,5 dagen. Het tijdstip en de waarde van de top bij Lobith wordt beïnvloed door de bewerking die de gemeten waarden uit het begin van de vorige eeuw hebben ondergaan. In het begin van de vorige eeuw is de afvoer bij Lobith eenmaal daags om acht uur 's morgens opgenomen. Deze afvoer is in de modelrandvoorwaarde verschoven naar midden op de dag. Hierdoor ontstaat een fout in het tijdstip van de afvoer van maximaal 23 uur. Daarnaast is om acht 's morgens niet het daggemiddelde gemeten. De werkelijke waarde van het daggemiddelde is onbekend. Vanaf het midden van de vorige eeuw kunnen betrouwbare daggemiddelden van de afvoer bij Lobith worden bepaald.

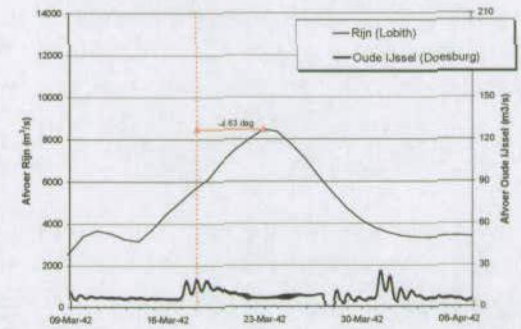

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.04 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
04-Jan-20
11-Jan-20
18-Jan-20
25-Jan-20
01-Feb-20

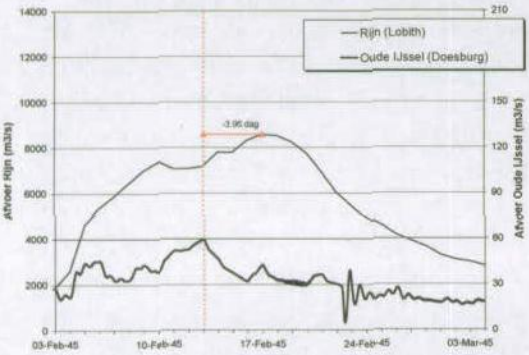

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-5.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
24-Oct-24
31-Oct-24
07-Nov-24
14-Nov-24
21-Nov-24

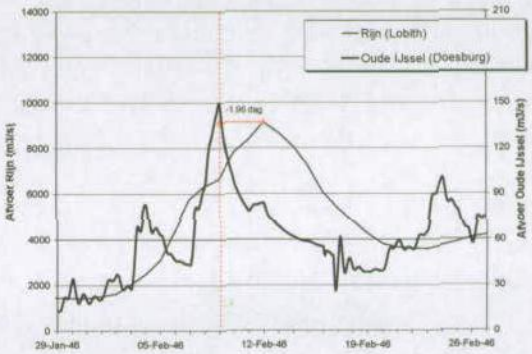

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-2.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
21-Dec-25
28-Dec-25
04-Jan-26
11-Jan-26
18-Jan-26

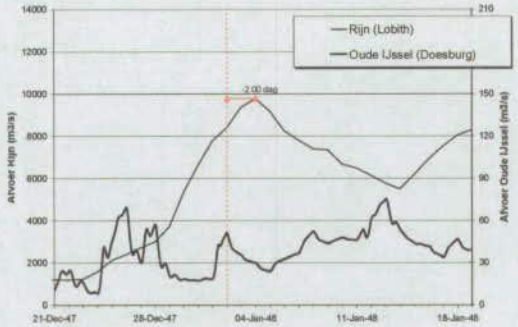

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-3.96 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
13-Nov-30
20-Nov-30
27-Nov-30
04-Dec-30
11-Dec-30

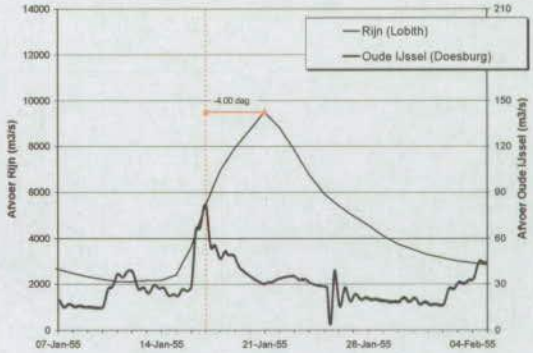

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.96 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
19-Nov-39
26-Nov-39
03-Dec-39
10-Dec-39
17-Dec-39

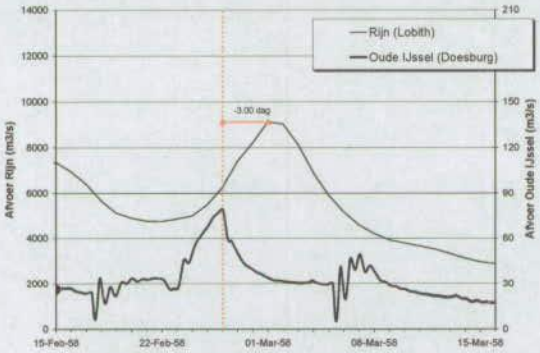

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.63 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
09-Mar-42
16-Mar-42
23-Mar-42
30-Mar-42
06-Apr-42

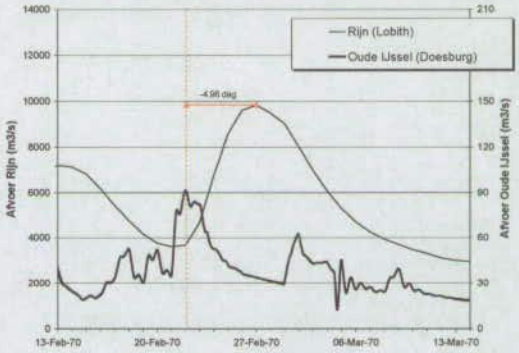

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-3.95 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
03-Feb-45
10-Feb-45
17-Feb-45
24-Feb-45
03-Mar-45

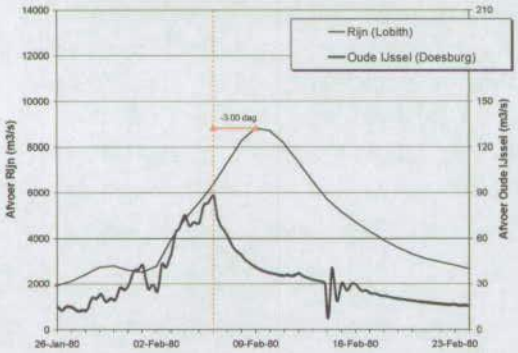

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-1.96 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
29-Jan-46
05-Feb-46
12-Feb-46
19-Feb-46
26-Feb-46

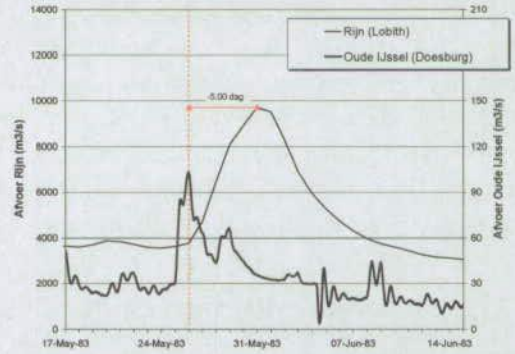

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-2.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
21-Dec-47
28-Dec-47
04-Jan-48
11-Jan-48
18-Jan-48

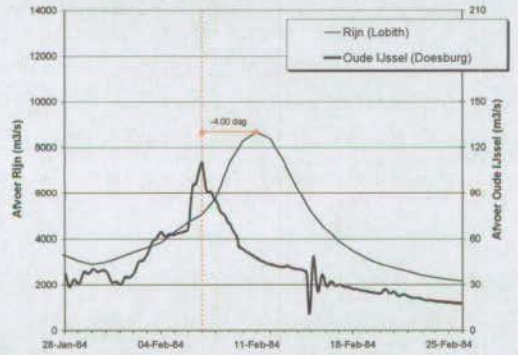

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
07-Jan-55
14-Jan-55
21-Jan-55
28-Jan-55
04-Feb-55

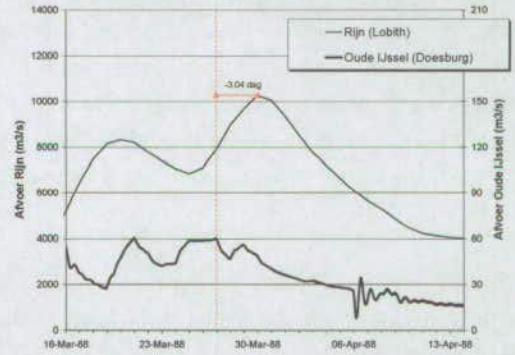

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-3.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
15-Feb-58
22-Feb-58
01-Mar-58
08-Mar-58
15-Mar-58

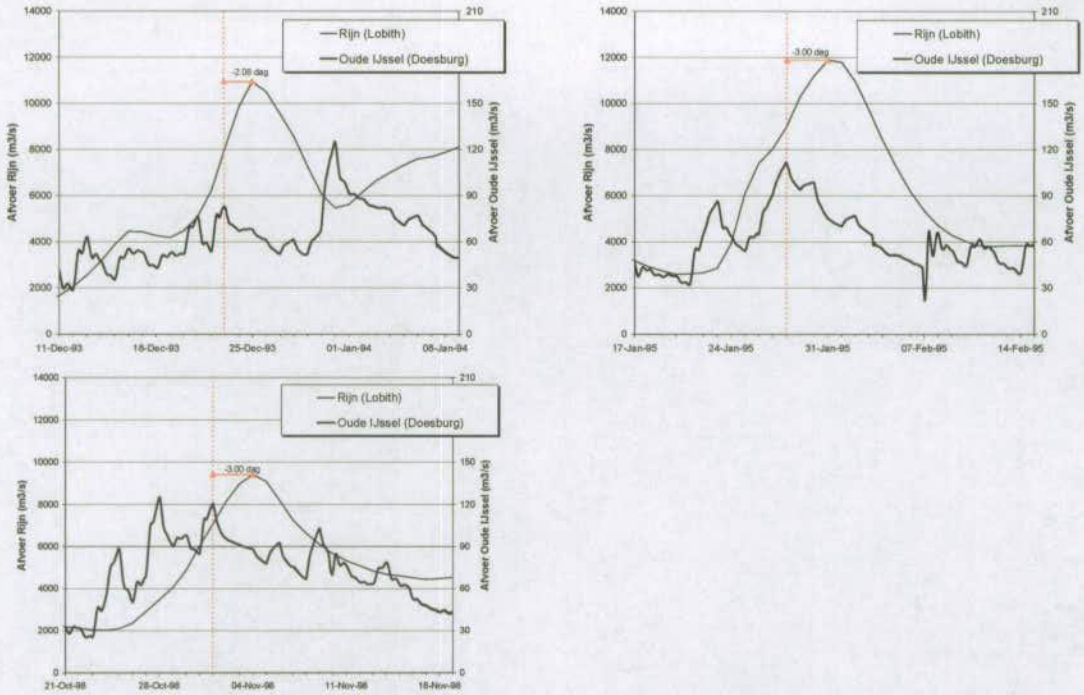

Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.96 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
13-Feb-70
20-Feb-70
27-Feb-70
06-Mar-70
13-Mar-70


Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-3.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
26-Jan-80
02-Feb-80
09-Feb-80
16-Feb-80
23-Feb-80


Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-5.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
17-May-83
24-May-83
31-May-83
07-Jun-83
14-Jun-83


Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-4.00 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
28-Jan-84
04-Feb-84
11-Feb-84
18-Feb-84
25-Feb-84


Rijn (Lobith)
Oude IJssel (Doesburg)
-3.04 dag
Afvoer Rijn (m3/s)
Afvoer Oude IJssel (m3/s)
16-Mar-88
23-Mar-88
30-Mar-88
06-Apr-88
13-Apr-88



Figuur 4-6: Afvoergolven op de Rijn en de Oude IJssel gedurende perioden, waarbij de topafvoer bij Lobith groter is dan 8000 m3/s.

Uit Figuur 4-6 blijkt dat nadat de afvoergolf op de Oude IJssel voorafgaande aan de afvoergolf op de Rijntakken tot een einde is gekomen, nog tijdens de val van de golf op de Rijntakken andere afvoergolven op de Oude IJssel kunnen ontstaan. Deze afvoergolven worden echter veroorzaakt door neerslaggebeurtenissen die geen relatie hebben met het ontstaan van de afvoergolf op de Rijntakken. Ze zijn der halve onafhankelijk van de afvoergolf op de Rijntakken.

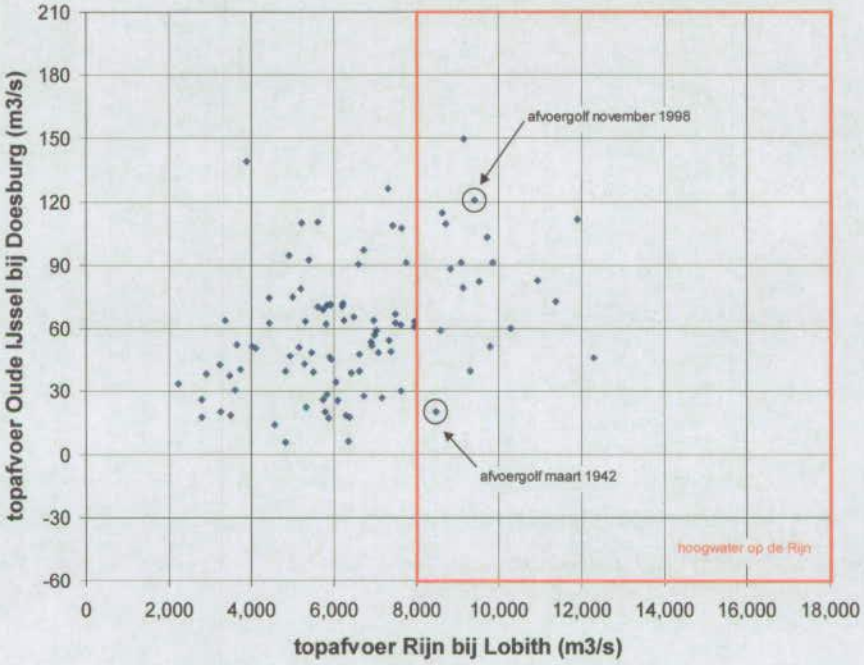
4.3.2 Topafvoer Rijn en Oude IJssel

Omdat een afvoergolf op de Rijntakken altijd gepaard gaat met een bijbehorende afvoergolf op de Oude IJssel, wordt in deze paragraaf beschreven hoe de topafvoer van de afvoergolf op de Oude IJssel bij Doesburg is gerelateerd aan de topafvoer op de Rijn bij Lobith. Met het gekoppelde Sobek-RE model van de Rijntakken en de Oude IJssel zijn 99 perioden doorgerekend, waarin het hydrologisch jaarmaximum van de afvoer bij Lobith op is getreden. Voor elke berekening is bepaald hoe groot de topafvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en op de Rijn bij Lobith is.

In Figuur 4-7 is de topafvoer op de Oude IJssel uitgezet tegen de topafvoer op de Rijn. De figuur laat een grote spreiding in de topafvoer van de Oude IJssel zien. Ook als wordt gekeken naar de perioden met een topafvoer bij Lobtih groter dan 8000 m^3/s (rechthoek) is deze spreiding aanwezig. Deze spreiding wordt veroorzaakt door een verschillende genese van de afvoergolf op de Rijntakken (RIZA, 2002b). Als voorbeeld kunnen de afvoergolven van maart 1942 en november 1998 worden genomen (omcirkeld in de figuur).

Het hoogwater van maart 1942 komt vooral van de Main en de Neckar. Bij Frankfurt heeft dit hoogwater een herhalingstijd van 1/30 jaar. Omdat Moezel en noordelijke Niederrhein nauwelijks bijdragen is de herhalingstijd bij Lobith nog slechts 1/5 jaar. Voor het hoogwater van november 1998 geldt het omgekeerde. Tot aan de Moezel heeft dit hoogwater een

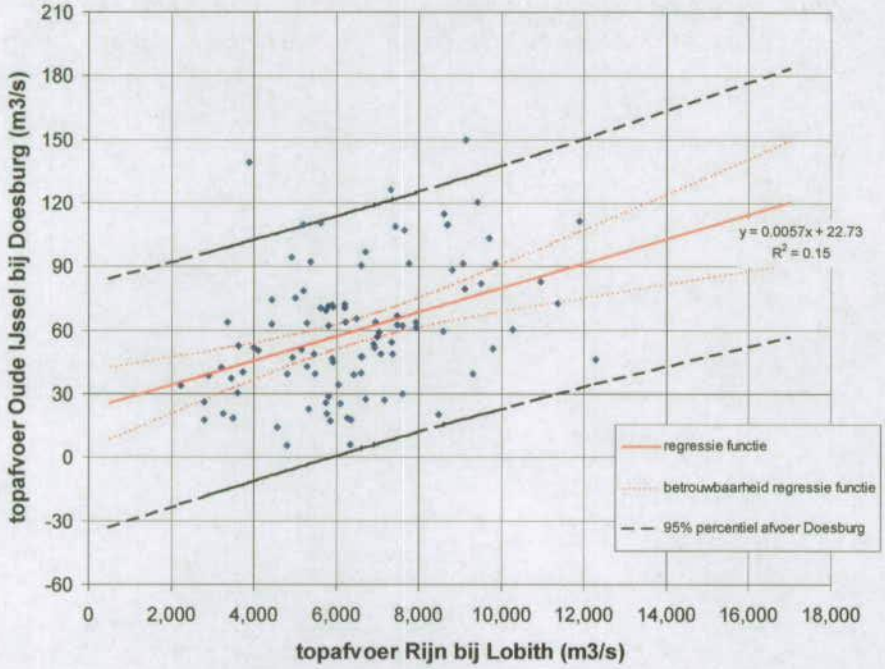
herhalingstijd van ca 1/2 jaar. Door grote bijdragen langs de noordelijke Niederrhein loopt de herhalingstijd bij Rees op tot 1/21 jaar. Door grootschalige overstroming van zomerkades bij Emmerich loopt de herhalingstijd bij Lobith terug naar 1/10 jaar (bron: dr. Engel van BfG). De Oude IJssel heeft voor maart 1942 een top van 20 m^3/s en voor november 1998 een top van 121 m^3/s.



Figuur 4-7: Topafvoer op de Oude IJssel als functie van de topafvoer op de Rijn.

Beschouwing van de genese van hydrologische jaarmaxima valt buiten het kader van de onderhavige studie. Bovendien is deze informatie lang niet altijd beschikbaar. Voor maatgevende condities bij Lobith wordt verondersteld dat deze vooral uit de Moezel en de noordelijke Niederrhein moet komen (RIZA, 2002b). Voor de doorvertaling naar maatgevende condities is het wel degelijk van belang een verband tussen de topafvoer van de Rijn en de Oude IJssel te ontwikkelen. Er kan namelijk een gemiddeld verband tussen Lobith en de Oude IJssel worden gevonden. Op grond van de genese van hydrologische jaarmaxima blijkt dat een neerslaggebeurtenis in het noorden en midden van het stroomgebied van de Rijn tot maatgevende condities lijkt. Het is aannemelijk dat een dergelijke neerslaggebeurtenis ook in het stroomgebied van de Oude IJssel optreedt. Voor maatgevende condities is er een afhankelijkheid tussen de afvoer op de Oude IJssel en de afvoer op de Rijn.

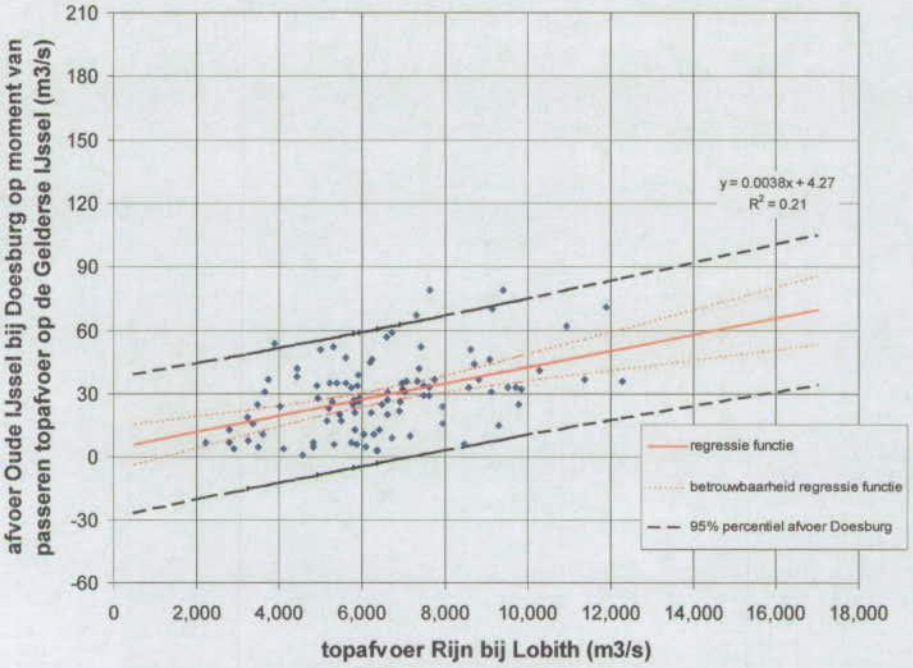
Een statische analyse is uitgevoerd naar dit gemiddelde verband. Aangenomen is dat er een lineaire relatie bestaat tussen de topafvoer bij Lobith en de topafvoer op de Oude IJssel bij Doesburg. In Figuur 4-8 is te zien dat de topafvoer op de Oude IJssel gelijk is aan 5 promille van de topafvoer bij Lobith plus 23 m3/s. De figuur toont aan dat er een zeer zwak verband is te ondekken tussen de topafvoer in Lobith en de topafvoer van de Oude IJssel. Er is echter wel een verband. Het verband wordt echter vertroebeld doordat aan de afvoer bij Lobith een verschillende genese hangt.



Figuur 4-8: Lineair verband tussen de topafvoer op de Rijn en de topafvoer op de Oude IJssel.

4.3.3 Topafvoer Rijn en afvoer Oude IJssel bij passage top op Gelderse IJssel

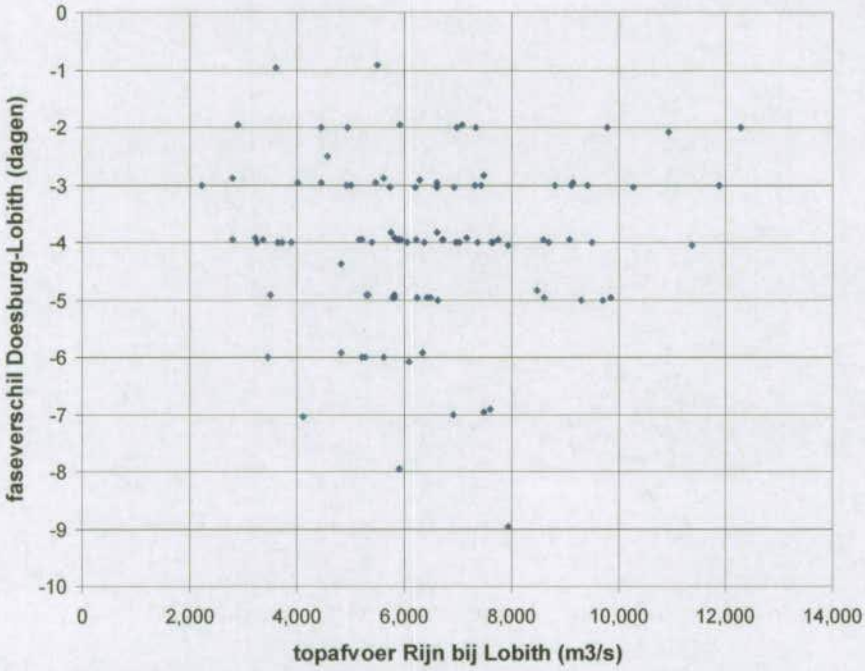
Dezelfde statische analyse is uitgevoerd voor de afvoer op de Oude IJssel op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel Doesburg passeert. Figuur 4-9 geeft het resultaat van deze analyse. De afvoer op de Oude IJssel op het moment van passage is gelijk aan 4 promille van de topafvoer op de Rijn bij Lobith plus 4 m3/s. Ook hier wordt opgemerkt dat het lineaire verband dat gevonden is zeer zwak is.



Figuur 4-9: Afvoer op de Oude IJssel op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel Doesburg passeert als functie van de topafvoer op de Rijn.

4.3.4 Topafvoer Rijn en faseverschil Rijn - Oude IJssel

Voor de berekeningen, die met het SOBEK-RE model van de Rijntakken en de Oude IJssel zijn gemaakt, is bepaald hoe groot het tijdsverschil is tussen het op treden van de topafvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en op de Rijn bij Lobith. In Figuur 4-10 is het faseverschil uitgezet tegen de topafvoer op de Rijn bij Lobith. De figuur toont aan dat er geen significant verband is tussen de topafvoer in Lobith en het faseverschil.



Figuur 4-10: Faseverschil tussen de topafvoer op de Oude IJssel en de topafvoer op de Rijn.

4.3.5 Samenvatting relatie afvoer Rijn en Oude IJssel

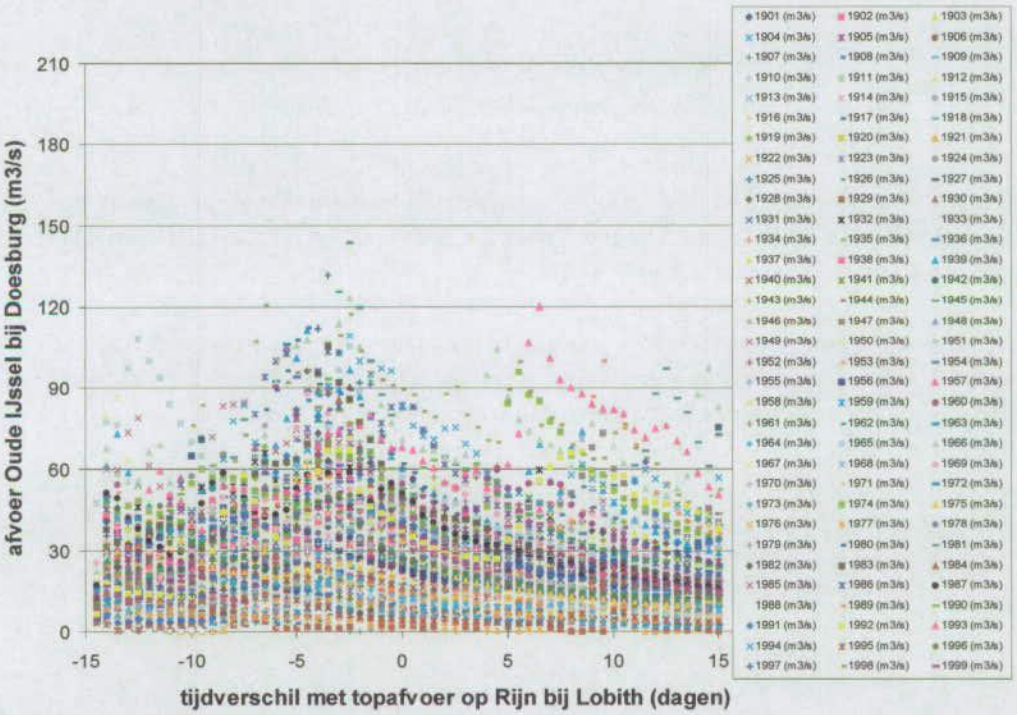
De samenhang tussen de afvoergolven op Rijn bij Lobith en op de Oude IJssel bij Doesburg kan als volgt worden samengevat:

- Een hoogwater op de Rijntakken gaat altijd gepaard met een bijbehorende afvoergolf op de Oude IJssel.
- Het afvoermaximum van de afvoergolf op de Oude IJssel (Doesburg) bedraagt 60 +/- 31 m3/s voor de 99 hydrologische jaarmaxima.
- Het afvoermaximum van de afvoergolf op de Oude IJssel treedt gemiddeld 4 +/- 1,5 dagen eerder op dan het afvoermaximum in Lobith en gemiddeld 4,5 +/- 1,5 dagen eerder dan het afvoermaximum op de IJssel ter plaatse van de monding van de Oude IJssel.
- Door neerslaggebeurtenissen die later in de tijd optreden dan de neerslag die heeft geleid tot de afvoergolf op de Rijntakken kunnen op de Oude IJssel andere afvoergolven ontstaan, die op het moment van passage hogere afvoeren kunnen veroorzaken.
- De gemiddelde afvoer van de Oude IJssel (Doesburg) op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel optreedt bedraagt 29 +/- 18 m3/s voor de 99 hydrologische jaarmaxima.
- Er is een zwak lineair verband gevonden tussen de topafvoer op de Oude IJssel en de topafvoer op de Rijn bij Lobith. Dat er sprake moet zijn van een verband wordt onderbouwd door de genese van diverse hoogwaters op de Rijntakken. De topafvoer op de Oude IJssel is gelijk aan 5 promille van de topafvoer bij Lobith plus 23 m3/s.
- Er is ook een zwak lineair verband gevonden tussen de afvoer op de Oude IJssel op het moment dat de topafvoer op de Gelderse Ijssel optreedt en de topafvoer bij Lobith. De afvoer op de Oude IJssel op moment van passage is 4 promille van de topafvoer bij Lobith plus 4 m3/s.
- Het faseverschil tussen de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en op de Rijn bij Lobith heeft geen relatie met de topafvoer bij Lobith.

4.4 Statistische beschouwing afvoer Oude IJssel

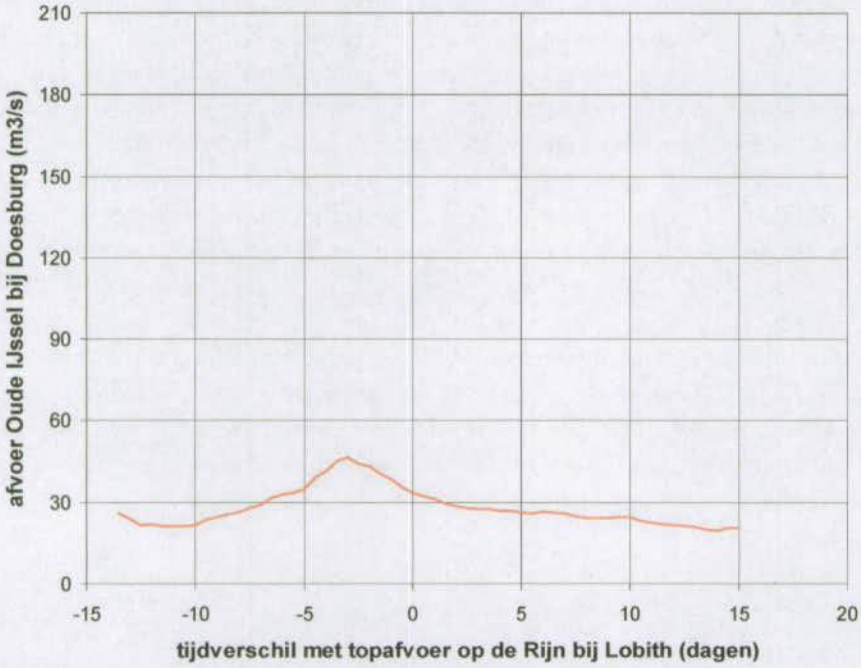
Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat bij passage van een afvoergolf op de Rijntakken altijd sprake is van een bijbehorende afvoergolf op de Oude IJssel, die gemiddeld 4 dagen eerder optreedt dan het afvoermaximum in Lobith. Er kan echter geen significant verband worden gevonden tussen de topafvoer in Lobith aan de ene kant en de topafvoer van de Oude IJssel of de afvoer van de Oude IJssel op het moment van passage aan de andere kant. De verklaring hiervoor is dat het stroomgebied van de Oude IJssel veel kleiner is dan het stroomgebied van de Rijn, met een veel snellere reactie op neerslaggebeurtenissen. Dit heeft ook tot gevolg dat tijdens een hoogwaterpassage op de Rijntakken, zich op de Oude IJssel meerdere afvoergolven kunnen voordoen, zie ook paragraaf 4.3.1. Dit maakt het moeilijk om de afvoergolven op de Oude IJssel, die horen bij de golf op de hoofdrivier, te isoleren en op basis waarvan met behulp van bijvoorbeeld de golfvorm-generator-methodiek een gemiddelde golf gedefinieerd zou kunnen worden. Maar vooral geldt dat het optreden van meerdere afvoergolven na de golf die hoort bij de afvoergolf op de Rijntakken, van invloed is op de hoogwaterstanden op de Rijntakken. Immers, het hoogwater op de Oude IJssel dat hoort bij het hoogwater op de Rijntakken, treedt veelal enkele dagen eerder op. Alle volgende afvoergolven kunnen samenvallen met het hoogwater op de Rijntakken. En dus moet die informatie worden meegenomen.

Om die reden is andere methodiek dan de oorspronkelijk beoogde standaardmethodiek van de golfvorm-generator gevolgd. De methodiek bestaat er uit dat een statische beschrijving van het verloop van de afvoer op de Oude IJssel wordt bepaald. De hiervoor benodigde basisgegevens zijn alle afvoergolven op de Oude IJssel die horen bij de afvoergolven op de hoofdrivier die worden gebruikt ter bepaling van de werklijn.



Figuur 4-11: Afvoergolven op de Oude IJssel behorende bij de hydrologische jaarmaxima op de Rijntakken.

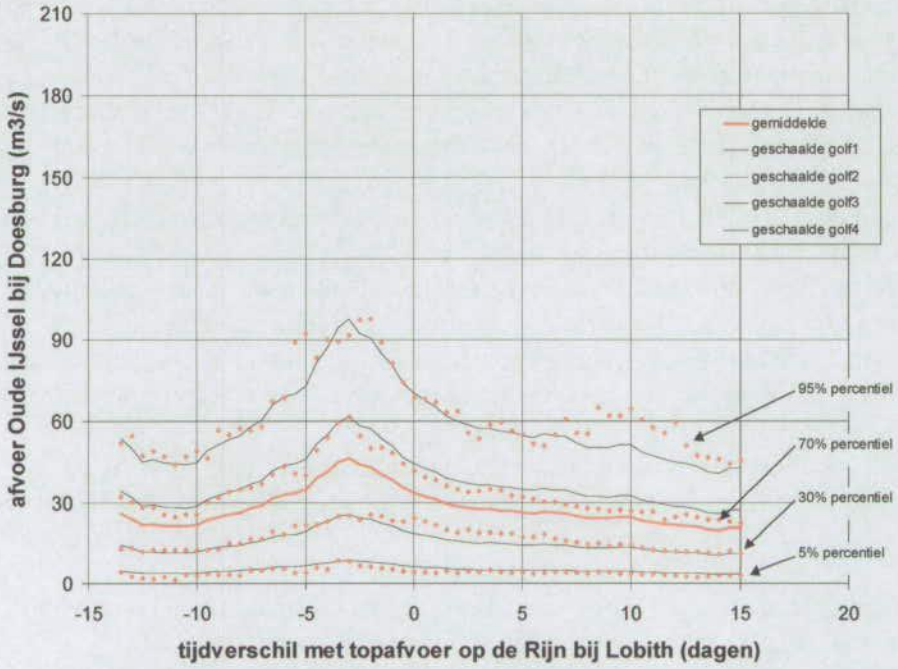
Figuur 4-11 toont het verloop van de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg voor deze 99 perioden. Door nu op tijdstippen met vaste intervallen de gemiddelde afvoer te bepalen uit alle opgetreden afvoeren, wordt het gemiddelde afvoerverloop tijdens een hoogwaterpassage op de Gelderse IJssel verkregen (Figuur 4-12). Dit is dan tevens het verloop van de afvoer op de Oude IJssel zoals dat als basis toegepast kan worden voor de afvoer van de oude IJssel onder maatgevende conditie. Uit de figuur blijkt dat de top in het gemiddelde afvoerverloop op de oude IJssel 3,5 dag eerder optreedt dan de maximale afvoer bij Lobith.



Figuur 4-12: Het gemiddelde verwachte afvoerverloop van de Oude IJssel bij een hoogwater op de Rijntakken.

Aangezien 99 afvoerverlopen bekend zijn, kan met even groot gemak bijvoorbeeld het 95% percentiel van het afvoerverloop worden gevonden. De waarden hiervan zijn namelijk gelijk aan de waarden van de 5 hoogste waarnemingen op alle tijdstippen.

In Figuur 4-13 is het gemiddelde afvoerverloop geschaald volgens de methode van de golfgenerator met een constante vermenigvuldigingsfactor. Uit de figuur blijkt dat met deze opschalingsmethode ieder gewenst statistisch afvoerverloop (uitgedrukt in een percentiel) kan worden gevonden op basis van het verwachte afvoerverloop alleen. Daarmee wordt aangenomen dat met de opschaling tot een gewenste niveau ook een afvoerverloop wordt gevonden dat past binnen de gevonden statistiek van mogelijke afvoerverlopen.



Figuur 4-13: Gemiddelde verwachte afvoerverloop van de Oude met de percentielen bij een hoogwater op de Rijntakken.

4.5 Afvoer Oude IJssel voor RWV2006

In het onderhavige onderzoek is een reeks van 100 jaar afvoeren gegenereerd, dit blijft een relatief korte reeks om uitspraken te doen over maatgevende condities voor de Rijntakken. Voor een betrouwbare uitspraak zou een reeks van duizenden jaren nodig zijn. Op termijn kan de neerslag-generator van het KNMI daarin verbetering brengen. Vooralsnog moet gebruik worden gemaakt van de resultaten van dit onderzoek.

De statistische beschouwing van het afvoergedrag van de Oude IJssel gegeven een hoogwater op de Rijntakken in de vorige hoofdstukken biedt geen eenduidig antwoord op de vraag welke randvoorwaarde voor de oude IJssel gekozen moet worden voor toepassing in RVW2006. In Figuur 4-8 en Figuur 4-9 zijn regressiefuncties weergegeven tussen: topafvoer bij Lobith en topafvoer oude IJssel en tussen topafvoer bij Lobith en afvoer oude IJssel bij passage van de top op de IJssel. Deze regressiefuncties zijn feitelijk gebaseerd op een 'gemiddelde' genese van afvoergolven bij Lobith. In Figuur 4-7 en de bijgaande tekst is het belang van deze genese toegelicht. Uitgevoerd onderzoek in het kader van het randvoorwaardenboek 2001 (RIZA, 2002b) heeft aangetoond dat een maatgevende conditie op de Rijntakken vooral tot stand komt door een extreme neerslaggebeurtenis in het midden en noordelijke deel van het stroomgebied van de Rijn. Een voorbeeld hiervoor is het hoogwater november 1998.

Als uitgangspunten bij de bepaling van de afvoergolf op de Oude IJssel onder maatgevende omstandigheden op de Rijntakken kunnen genoemd worden:

- Als rekening gehouden wordt met de genese van een maatgevend hoogwater bij Lobith zal toepassen van de regressiefuncties uit Figuur 4-8 en Figuur 4-9 zeker niet leiden tot overschatting van de afvoer van de Oude IJssel.
- In de neerslag-afvoermodellering worden afvoertoppen op de Oude IJssel gemiddeld 18% onderschat. De afvoer van de oude IJssel op het moment van passage wordt echter gemiddeld ca. 10% overschat.
- De afvoer van de Oude IJssel op het moment van passage van de afvoertop op de rivier is bepalend voor de maatgevend waterstanden.
- Het gemiddelde afvoerverloop uit Figuur 4-12 en Bijlage E dient als basis voor het verloop van de afvoer van de Oude IJssel onder maatgevende omstandigheden op de Rijntakken
- Bij het gemiddelde afvoerverloop van de Oude IJssel uit Figuur 4-12 bedraagt de top op T-84 uur 45 m3/s en de afvoer op het moment van passage van de afvoertop op de IJssel op T+14 uur 32 m3/s.
- Het gemiddelde afvoerverloop van de Oude IJssel uit Figuur 4-12 mag conform de methodiek van de golfgenerator met een constante vermenigvuldigingsfactor opgeschaald worden.

Op basis van deze uitgangspunten zal het verloop van de afvoer van de Oude IJssel onder maatgevende condities op de Rijntakken moeten worden gedefinieerd.

5 Conclusies

Neerslag
Van de stations Arnhem, Denekamp, Heerde en Winterswijk zijn neerslagreeksen van 100 jaar beschikbaar. Uit een analyse met Thiessen polygonen blijkt dat bijna het gehele stroomgebied alleen door het station te Winterswijk wordt beïnvloed (97%). De 100 jarige reeks neerslag van station Winterswijk is bruikbaar voor het berekenen van een homogene langjarige afvoerreeks van de Oude IJssel. Alleen de neerslag van dit station is gebruikt in de analyse van de afvoer van de Oude IJssel.

Modellering stroomgebied Oude IJssel
Op basis van een uitvoerige verificatie van de modellering van de Oude IJssel wordt geconcludeerd dat een goede schatting gemaakt kan worden van de afvoeren van de Oude IJssel bij hoogwater perioden op de Rijntakken. Hiervoor moeten de berekeningsresultaten echter wel worden gecorrigeerd voor een gemiddelde modelfout. Deze fout bedraagt +18 procent voor de topafvoer en -10 procent voor de afvoer op het moment dat de topafvoer op de Gelderse IJssel Doesburg passeert.

Afvoer Oude IJssel
De afvoer van de Oude IJssel bij stuw de Pol bij herhalingstijd 100 jaar bedraagt 126 m3/s. Bij herhalingstijd 1250 jaar is de afvoer bij de Pol gelijk aan 151 m3/s. In het extreme bereik is de topafvoer bijde monding van de Oude IJssel (te Doesburg) ongeveer 10 procent plus 12 m3/s groter dan de topafvoer bij de Pol. Zonder inzet van het retentiebekken langs de Bielheimerbeek is de topafvoer bij Doesburg ongeveer 30 procent groter dan de topafvoer bij de Pol. Het waterschap heeft aangegeven dat het fysisch afvoermaximum van de Oude IJssel gelijk is aan 180 m3/s. Het kan zijn dat de Oude IJssel of de beken die in de Oude IJssel uitmonden bij deze afvoer buiten zijn/hun oevers treden. In de berekeningen is het niet voorgekomen dat de afvoer op Oude IJssel bij Doesburg hoger is dan 180 m3/s. Deze 180 m3/s wordt ook niet overschreden als de uurafvoeren met 18 procent worden gecorrigeerd. Tot slot zij vermeld dat het afvoerverloop van de Oude IJssel nauwelijks wordt beïnvloed door het afvoerverloop op de Gelderse IJssel.

Afvoer Oude IJssel tijdens hoogwater op de Rijntakken
Een hoogwater op de Rijntakken gaat altijd gepaard met een bijbehorende afvoergolf op de Oude IJssel. Dit wordt onderbouwd door de genese van bekende hoogwater perioden op de Rijn. Een maatgevende conditie op de Rijntakken komt vooral tot stand door een extreme neerslaggebeurtenis in het midden en noordelijke deel van het stroomgebied van de Rijn. Het is hoogst waarschijnlijk dat een dergelijke neerslaggebeurtenis ook extreme afvoer op de Oude IJssel zal veroorzaken. Door neerslaggebeurtenissen die later in de tijd optreden dan de neerslag die heeft geleid tot de afvoergolf op de Rijntakken kunnen op de Oude IJssel andere afvoergolven ontstaan, die op het moment van passage hogere afvoeren kunnen veroorzaken.

Afvoer Oude IJssel voor RVW2006
Door verschil in genese en het optreden van meerdere afvoergolven op de Oude IJssel gedurende een hoogwater periode op de Rijntakken, wordt de relatie tussen de afvoer op de Rijn bij Lobith en de op de Oude IJssel bij Doesburg vertroebeld. Er is een zwak lineair verband gevonden tussen de topafvoer op de Oude IJssel en de topafvoer op de Rijn bij Lobith. Volgens dit verband is de topafvoer op de Oude IJssel gelijk aan 5 promille van de topafvoer bij Lobith

plus 23 m3/s. De afvoer op de Oude IJssel op moment van passage is 4 promille van de topafvoer bij Lobith plus 4 m3/s. Het faseverschil tussen de afvoer op de Oude IJssel bij Doesburg en op de Rijn bij Lobith heeft geen relatie met de topafvoer bij Lobith.

Een statistische analyse van het verloop van de afvoer op de Oude IJssel in perioden rond de hydrologische jaarmaxima van de afvoer te Lobith (jaren 1901-2000), heeft geleid tot een gemiddeld verloop van de afvoer op de Oude IJssel gegeven een verhoogde afvoer bij Lobith. Er is aangetoond dat dit afvoerverloop kan worden opgeschaald naar elke willekeurige topafvoer.

Het onderzoek heeft geleid tot de volgende uitgangspunten voor de bepaling van de afvoer van de Oude IJssel onder maatgevende omstandigheden op de Rijntakken:

- Als rekening gehouden wordt met de genese van een maatgevend hoogwater bij Lobith zal het gevonden lineaire verband tussen de afvoer op de Rijn en Oude IJssel zeker niet leiden tot overschatting van de afvoer van de Oude IJssel.
- In de neerslag-afvoermodellering worden afvoertoppen op de Oude IJssel gemiddeld 18% onderschat. De afvoer van de oude IJssel op het moment van passage wordt echter gemiddeld ca. 10% overschat.
- Op basis van resultaten van het neerslag-afvoermodel is het gemiddelde verloop van de afvoer op de Oude IJssel gegeven een verhoogde afvoer bij Lobith vastgesteld. Dit gemiddelde verloop dient als basis voor de afvoer van de Oude IJssel onder maatgevende omstandigheden op de Rijntakken.
- Bij het gemiddelde verloop van de afvoer op de Oude IJssel bedraagt de top op T-84 uur 45 m3/s en de afvoer op het moment van passage van de afvoertop op de IJssel op T+14 uur 32 m3/s.
- De afvoer van de Oude IJssel op het moment van passage van de afvoertop op de rivier is bepalend voor de maatgevend waterstanden.
- Het gemiddelde verloop van de afvoer van de Oude IJssel mag conform de methodiek van de golfgenerator met een constante vermenigvuldigingsfactor worden opgeschaald.

6 Referenties

Chbab, E.H. en J.M. van Noortwijk (2002), *Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden*, RIZA rapport 2002.006, DG Rijkswaterstaat, Lelystad.

HKV (1999), *Pr264 Inregeling ruwheden Waqua-model Maas*, Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Directie Limburg.

HKV (2000), *Pr350 Automatische kalibratie van Sobek*, Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA Arnhem.

HKV (2001), *Pr439 Inregelen ruwheden Waqua-model maas versie C95-3*, Opdrachtgever: Rijkswaterstaat RIZA Arnhem.

Noortwijk van J.M, H.J. Kalk, M.T. Duits, and E.H. Chbab (2001), *The use of Bayes factors for model selection in structural reliability*, in R.B. Corotis, G.I. Schuëller, and M. Shinozuka, editors, Structural Safety and Reliability; Proceedings of the Eighth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Newport Beach, California, U.S.A., 17-22 June 2001. Lisse: Balkema.

Noortwijk van J.M., H.J. Kalk, and E.H. Chbab (2004), *Bayesian estimation of design loads, HERON*, (in press).

Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling en B.P. Fannery (1992), *Numerical recipes in Fortran 77*, 2nd ed., University Press, Cambridge.

RIZA (2002a), *Bouw en kalibratie SOBEK-Rijn, Versie 200.1 t/m 2000.3*, RIZA rapport 2002.039, Lelystad.

Riza (2002b), Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith., Riza rapport 2002.012, Lelystad.

Smedema, L.K. en D. W. Rycrofft (1988), *Land drainage, Planning and design of agricultural drainage systems*, Batsford ltd, Londen.

Snippen, E. (1997), *Ontwikkeling hydraulisch morfologisch model Oude IJssel en effectenstudie ecologische verbindingszone in Doetinchem*, Afstudeeropdracht CT&M, UT twente, Enschede.

Stolker, C., (1999), *Hydraulische- morfologische SOBEK-modellering Oude IJssel en Aa-strang en effectenstudie aanleg zandvang en/of stuw*, Afstudeeropdracht CT&M, UT twente, Enschede.

St. Umweltamt Herten (2004), Die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Arbeitsgebiet der Ijsselmeer-Zuflüsse/NRW, www.ijssel.nrw.de.

Visser, M., M.T. Duits en W van der Lee (2001), *An automatic calibration method for hydraulic models*, in: *Proceedings NCR-days 2001*, E Stouthamer and A G van Os, Netherlands Centre for River studies, ...

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte (2001), *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland, de Staringreeks*, Alterrra, Wageningen.

Wijbenga, J H A, M T Duits en J M van Noortwijk (1998), *Parameter optimalisation for two-dimensional flow modelling*, in: *Proceedings Hydroinformatics '98*,V Babovic and L C Larsen,p1037-1042, Balkema, Rotterdam.

Bijlagen

Bijlage A: Kalibratie neerslag-afvoermodel

Het Sacramento model is geijkt op op basis van uurgegevens van de afvoer op de locaties Rhedebrugge, Isselburg en stuw de Pol voor de jaren van 1993 tot en met 2000. De ijking van de het Sacramento model is uitgevoerd op basis van 12 afvoergolven uit de jaren 1993 tot en met 2000 (Tabel A-1). Met het Sacramento model wordt in 1 berekening de periode 1 januari 1990 tot en 31 december 2001 doorgerekend. Hierdoor kan de invloed van de begin-voorwaarden op het kalibratie resultaat worden verwaarloosd. Vervolgens wordt voor de 12 kalibratie perioden het verschil tussen de simulatie en de metingen berekend. Op basis van dit verschil worden de parameters aangepast.

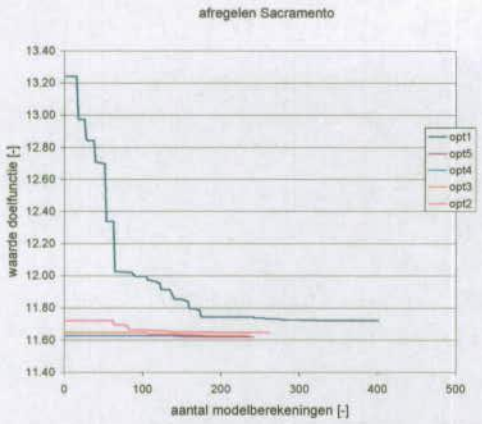
Afvoergolf	periode
1993Sep	01/09/1993 00:00:00 - 31/10/1993 22:00:00
1993Nov	01/11/1993 00:00:00 - 28/11/1993 00:00:00
1994Jan	15/01/1994 00:00:00 - 15/02/1994 00:00:00
1994Mrt	01/03/1994 00:00:00 - 01/05/1994 00:00:00
1994Okt	15/10/1994 00:00:00 - 04/12/1994 00:00:00
1994Dec	20/12/1994 00:00:00 - 09/01/1995 00:00:00
1995Jan	18/01/1995 00:00:00 - 05/03/1995 00:00:00
1998Feb	25/02/1998 00:00:00 - 01/04/1998 00:00:00
1998Sep	01/09/1998 00:00:00 - 01/10/1998 00:00:00
1998Okt	20/10/1998 00:00:00 - 01/12/1998 00:00:00
1999Feb	15/02/1999 00:00:00 - 06/04/1999 00:00:00
1999Dec	01/12/1999 00:00:00 - 01/01/2000 00:00:00

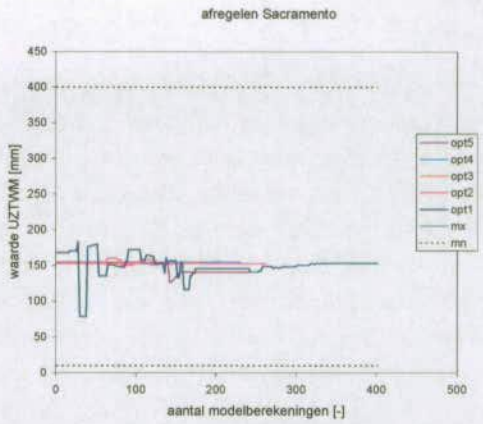
Tabel A-1: Kalibratie perioden.

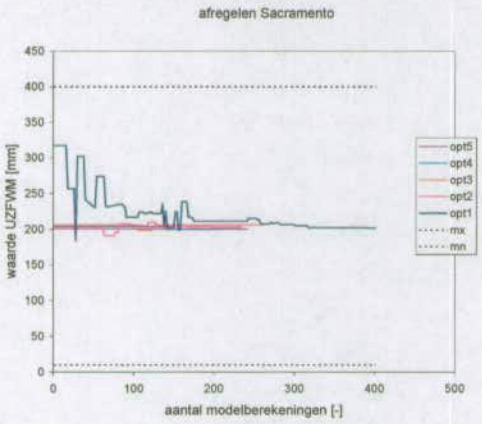
Kalibratie neerslag-afvoer relatie stuw de Pol

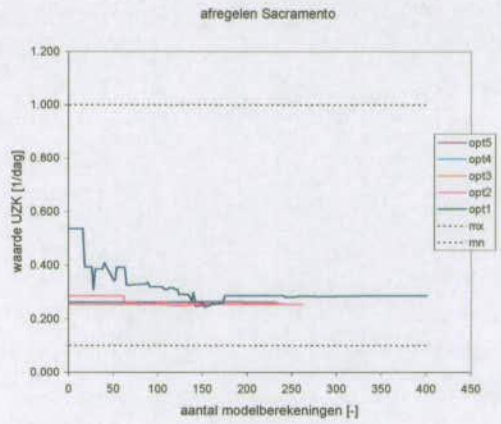
De perioden in 1993 zijn in de kalibratie van de neerslag-afvoer relatie stuw de Pol buiten beschouwing gelaten. Van dit jaar zijn geen metingen beschikbaar. De perioden in 1998 zijn getoetst aan gemiddelde dagafvoeren. Van dit jaar zijn geen uurwaarden beschikbaar.

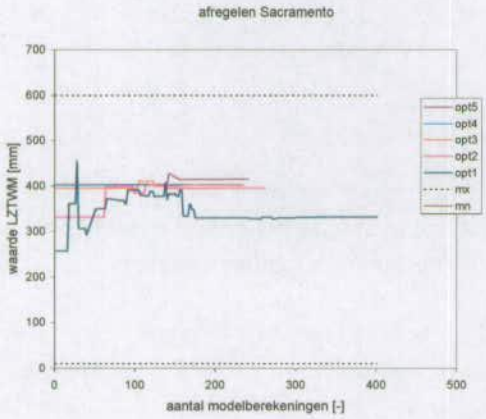
In Figuur A-1 wordt een overzicht gegeven van het kalibratie resultaat. In de eerste grafiek van de figuur is te zien dat in de eerste optimalisatie de waarde doelfunctie sterk daalt. Dit duidt er op dat het verschil tussen meting en simulatie afneemt. Na de tweede optimalisatie verandert het verschil tussen meting en simulatie nog nauwelijks. De overige grafieken van de figuur laten de verandering zien van de kalibratie parameters gedurende de kalibratie. Uit deze grafieken blijkt dat ook de parameters na twee optimalisaties nog nauwelijks veranderen. Er zijn twee parameters, LZSK en REXP, waarvan de waarde tegen de grens van de gestelde bandbreedte ligt. De drainage weerstand van het snelreagerende reservoir van de *lower zone* ligt tegen de bovengrens van de bandbreedte. Dit duidt er op dat het reservoir sneller grondwater moet afvoeren. Parameter REXP bepaalt de snelheid waarmee de percolatie capaciteit verandert. Ook deze parameter ligt tegen de bovengrens van de gestelde bandbreedte. De percolatie capaciteit moet dus sneller veranderen van gering (bij droge bodem) naar maximaal (bij natte bodem). De overige parameters blijven ruim binnen de gestelde bandbreedte.

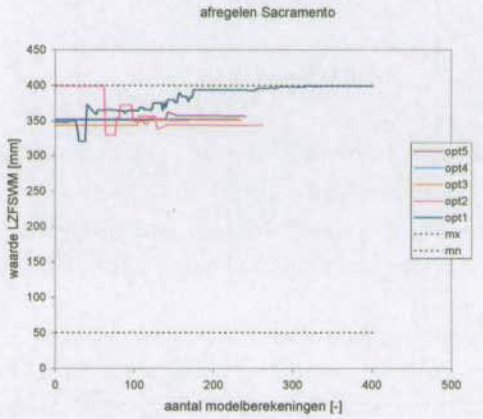

afregelen Sacramento
waarde doelfunctie [-]
aantal modelberekeningen [-]
opt1
opt5
opt4
opt3
opt2

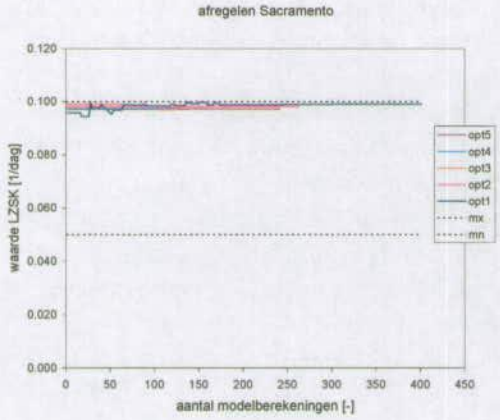

afregelen Sacramento
waarde UZTWM [mm]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn

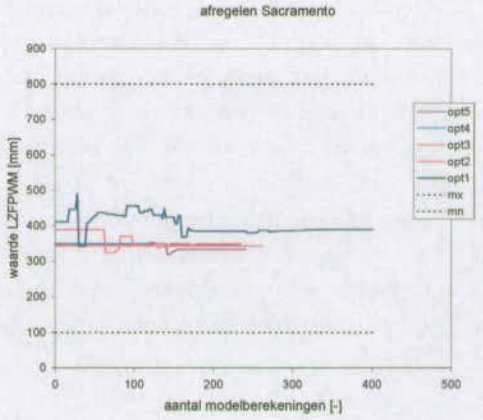

afregelen Sacramento
waarde UZFWM [mm]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn

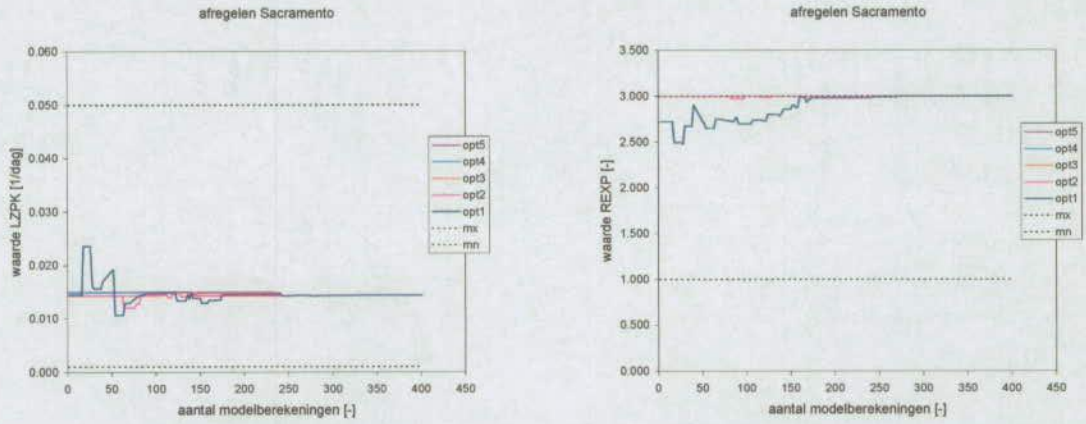

afregelen Sacramento
waarde UZK [1/dag]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn


afregelen Sacramento
waarde LZTWM [mm]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn


afregelen Sacramento
waarde LZFSWM [mm]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn

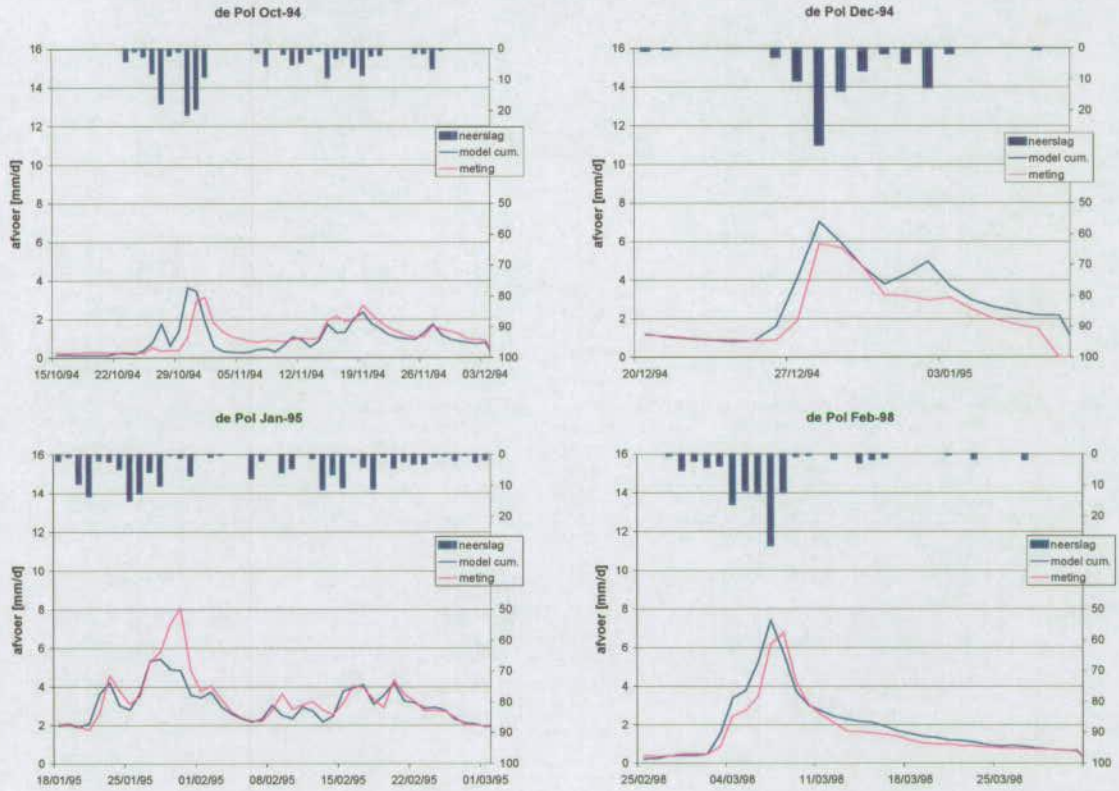

afregelen Sacramento
waarde LZSK [1/dag]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn

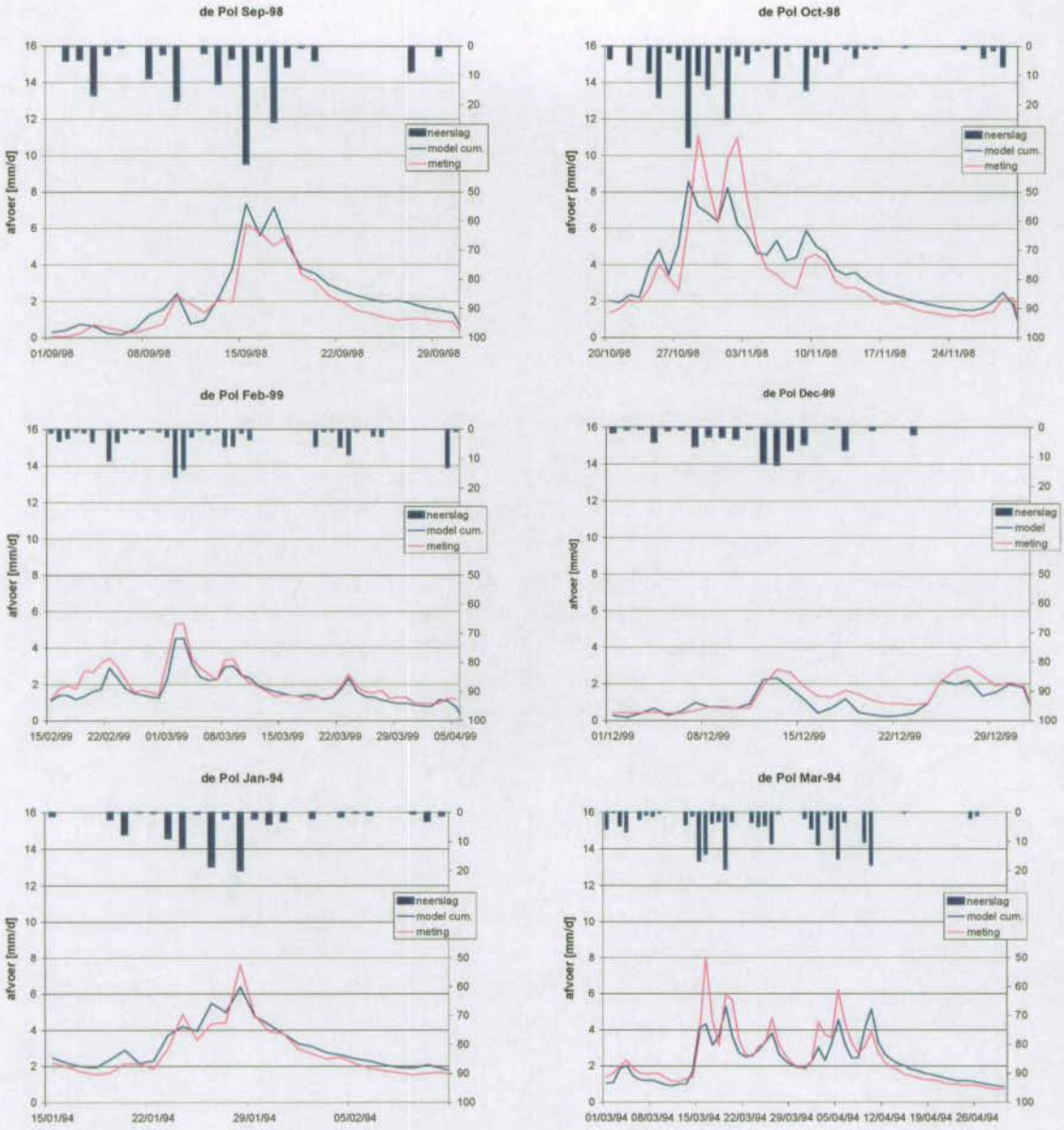

afregelen Sacramento
waarde LZFPWM [mm]
aantal modelberekeningen [-]
opt5
opt4
opt3
opt2
opt1
mx
mn



Figuur A-1: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol.

In de onderstaande figuur wordt een overzicht gegeven van het kalibratie-resultaat in de gesimuleerde perioden. Door de afvoer te vermenigvuldigen met het oppervlak achter het meetpunt, wordt een afvoerverloop in millimeters verkregen. Uit de grafieken blijkt dat de simulatie de metingen goed benadert. Bij enkele topafvoeren geeft het model een hogere waarde, bij andere een lagere. Het volume van de golven wordt redelijk goed gereproduceerd door het model. De timing van de afvoergolven lijkt ook goed te worden gesimuleerd. De parameters LZSK en REXP worden daarom niet verder aangepast. In Tabel A-2 is de parameter set van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol weergegeven.





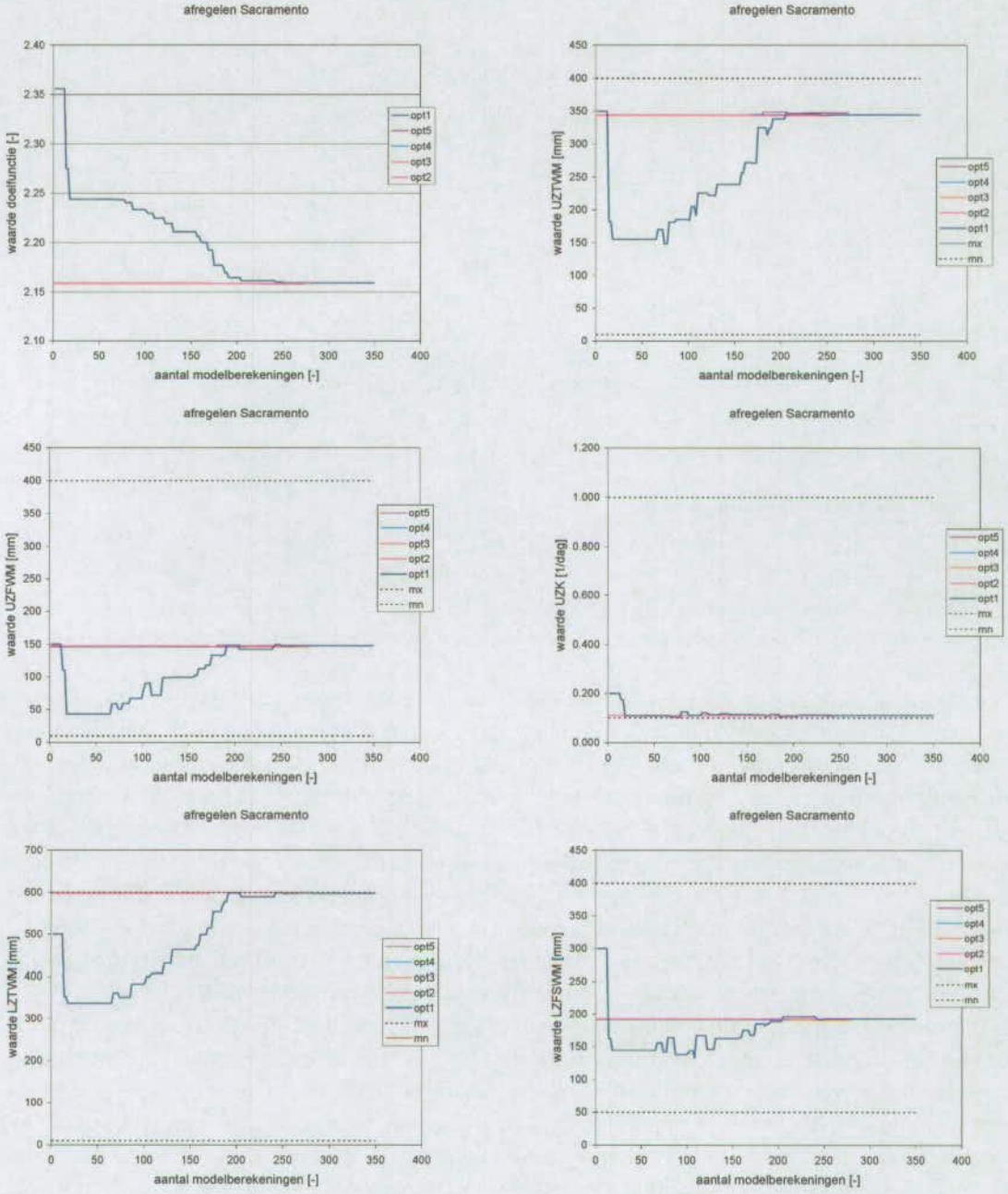
Figuur A-2: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol.

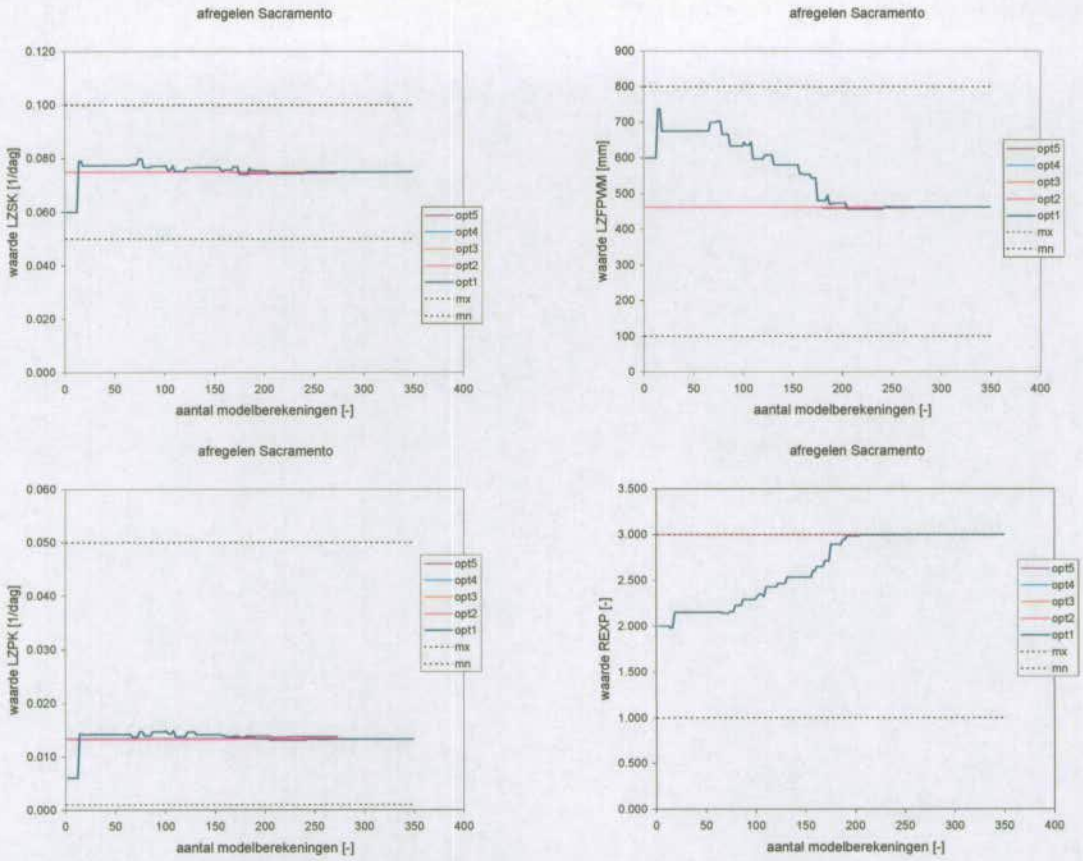
neerslag-afvoer relatie stuw de Pol			
id	2		
Surface	96146 ha	UZTWM	141 mm
ZPERC	27	UZFWM	201 mm
PFREE	0,1	UZK	0,256 1/dag
RSERV	0,1	LZTWM	415 mm
PCTIM	0,05	LZFSWM	357 mm
ADIMP	0	LZSK	0,097 1/dag
SARVA	0,03	LZFPWM	333 mm
SIDE	0	LZPK	0,015 1/dag
SSOUT	0	REXP	3,0

Tabel A-2: Gekalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol.

Kalibratie neerslag-afvoer relatie Isselburg

Alle kalibratie perioden uit Tabel A-1 zijn gebruikt om de neerslag-afvoer relatie Isselburg af te regelen en in alle perioden zijn uurwaarden gebruikt. Een overzicht van de kalibratie wordt gegeven in Figuur A-3.





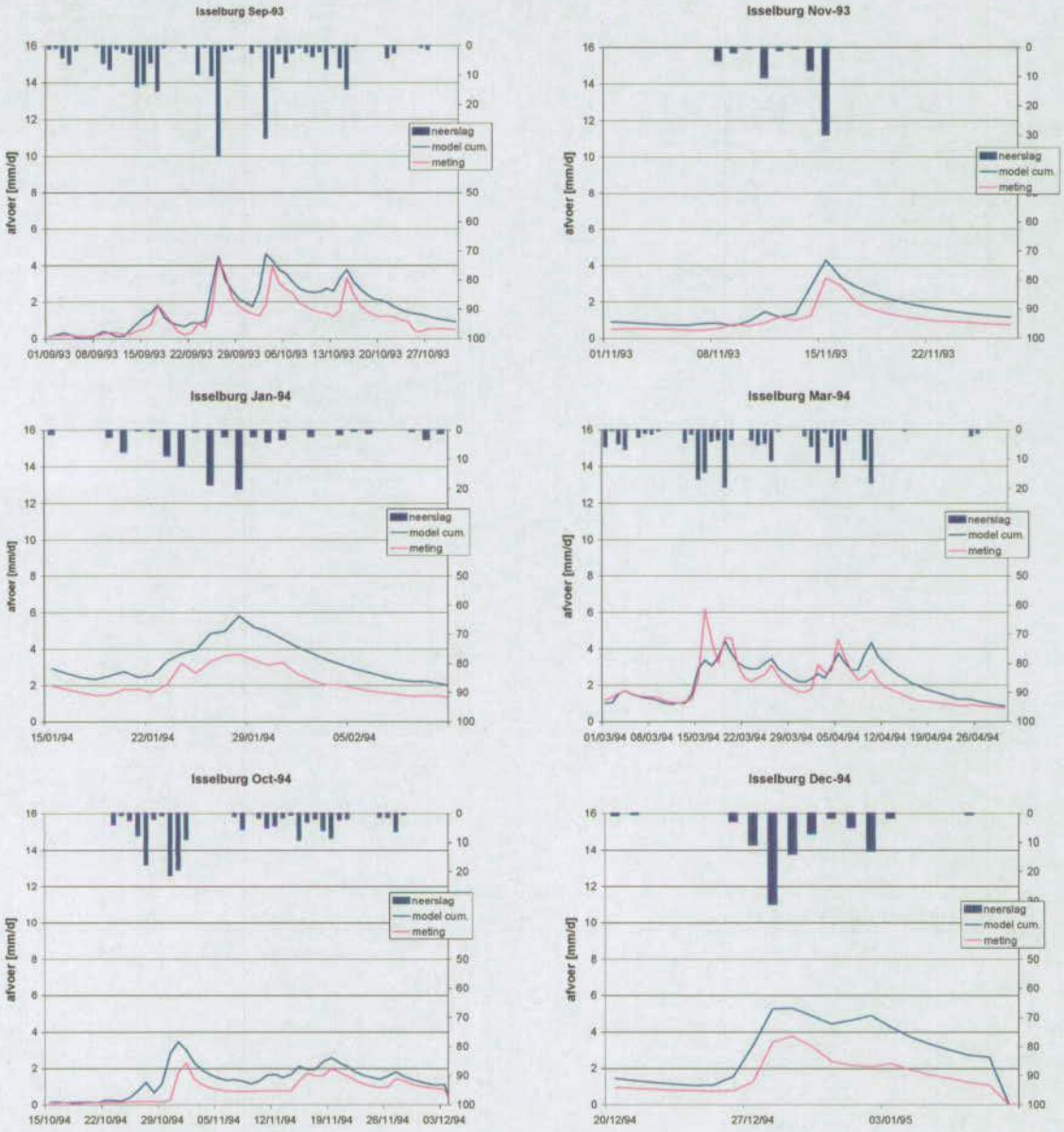
Figuur A-3: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie Isselburg.

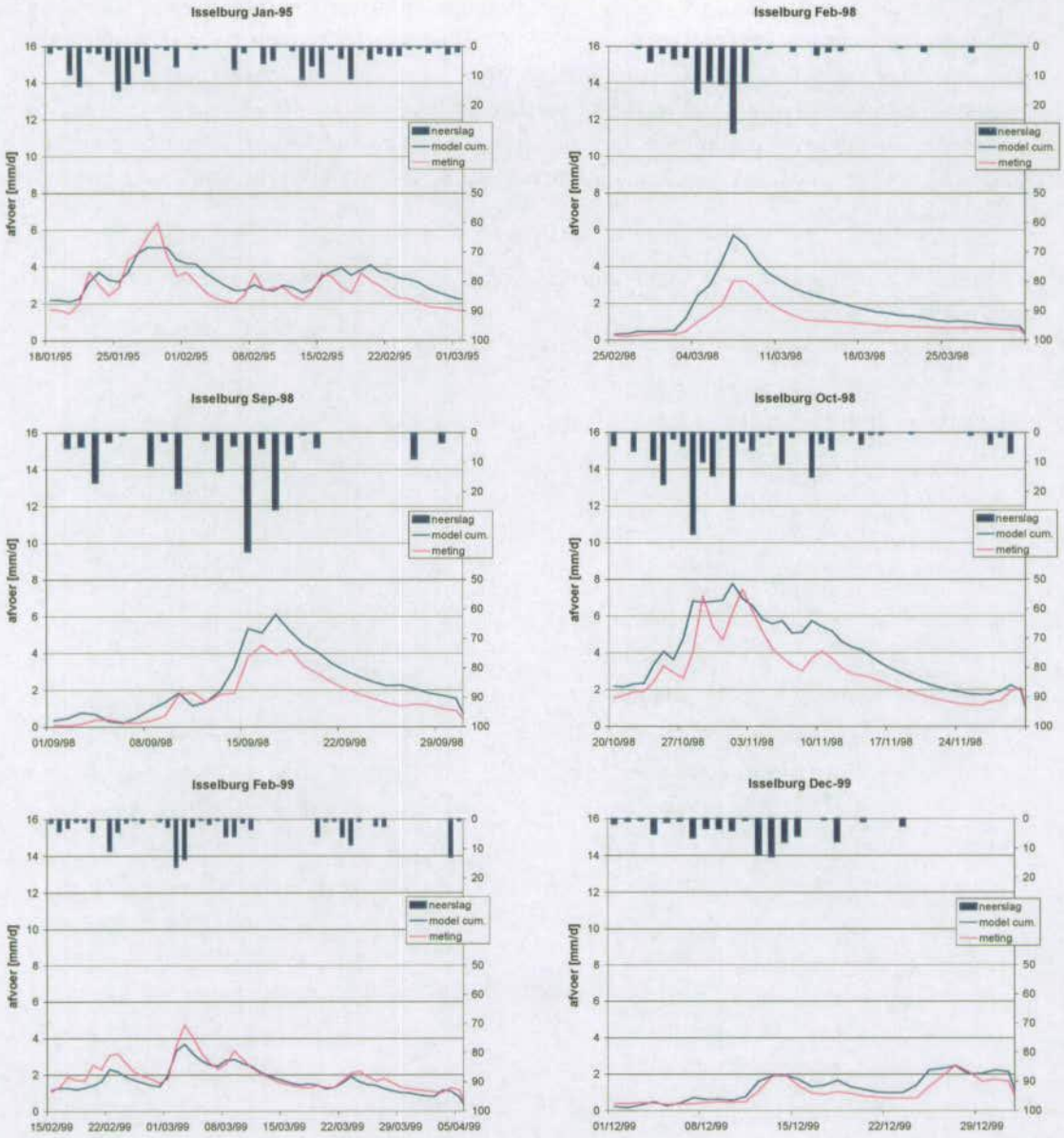
In de eerste grafiek van de figuur is te zien dat in de eerst optimalisatie de waarde doelfunctie sterk daalt. Na de eerste optimalisatie verandert het verschil tussen meting en simulatie nog nauwelijks. Uit de overige grafieken blijkt dat de parameters na de eerste optimalisatie nog nauwelijks veranderen. Er zijn drie parameters, UZK, LZTWM en REXP, waarvan de waarde tegen de grens van de gestelde bandbreedte ligt. De drainage weerstand van de *upper zone* ligt tegen de ondergrens van de bandbreedte. Dit duidt er op dat het reservoir trager grondwater moet afvoeren. Omdat de drainage weerstand LZSK tegen een waarde van 0,08 aan ligt, wordt verwacht dat de waarde van UZK nauwelijks lager is dan de ondergrens van 0,10. De waarde van parameter LZTWM ligt dicht tegen de bovengrens aan van de gestelde bandbreedte. Dit duidt erop dat meer water in de *lower zone* voor transpiratie beschikbaar moet zijn. Verondersteld wordt dat in de benedenloop van de Issel gedurende droge perioden water vanuit de beek het grondwater aanvult. Dit proces wordt niet door het model gesimuleerd. Omdat de dikte van de *lower zone* met 7 m al aanzienlijk is, wordt de waarde van deze parameter niet verder aangepast. Daarnaast is niet duidelijk of in het stroomgebied van de Issel wegzijging van grondwater optreedt. Hierdoor zal ook minder neerslag via de Issel tot afvoer komen. Net als bij de neerslag-afvoer relatie stuw de Pol blijkt de paramater REXP een te kleine bovengrens heeft. De Hymos handleiding geeft aan dat deze parameter meestal binnen de gestelde bandbreedte ligt. De overige parameters blijven ruim binnen de gestelde bandbreedte.

In Figuur A- wordt een overzicht gegeven van het kalibratie resultaat in de gesimuleerde perioden. Uit de figuren blijkt dat de simulaties de metingen redelijkbenadert. Het model lijkt meer water af te voeren dan de metingen. In werkelijkheid blijft meer water in het gebied achter of verdwijnt via verdamping of wegzijging het gebied. In de perioden Jan94, Dec94, en

Feb98 presteert het model slecht. Omdat in deze perioden de verdamping gering is en bodem verzadigt mag worden verondersteld, zal dit niet aan parameter LZTWM liggen. De drainage weerstanden en de overige capaciteiten van de *lower zone* lijken optimaal (Figuur A-3). Geconcludeerd wordt dat om het model te verbeteren meer gegevens van het stroomgebied van de Issel beschikbaar moeten komen. Met een analyse van de werkelijke verdamping en/of wegzijging lijkt het model te kunnen worden verbeterd. Voor de onderhavige studie wordt het model niet aangepast.

In Tabel A-3 is de parameter set van neerslag-afvoer relatie Isselburg weergegeven.





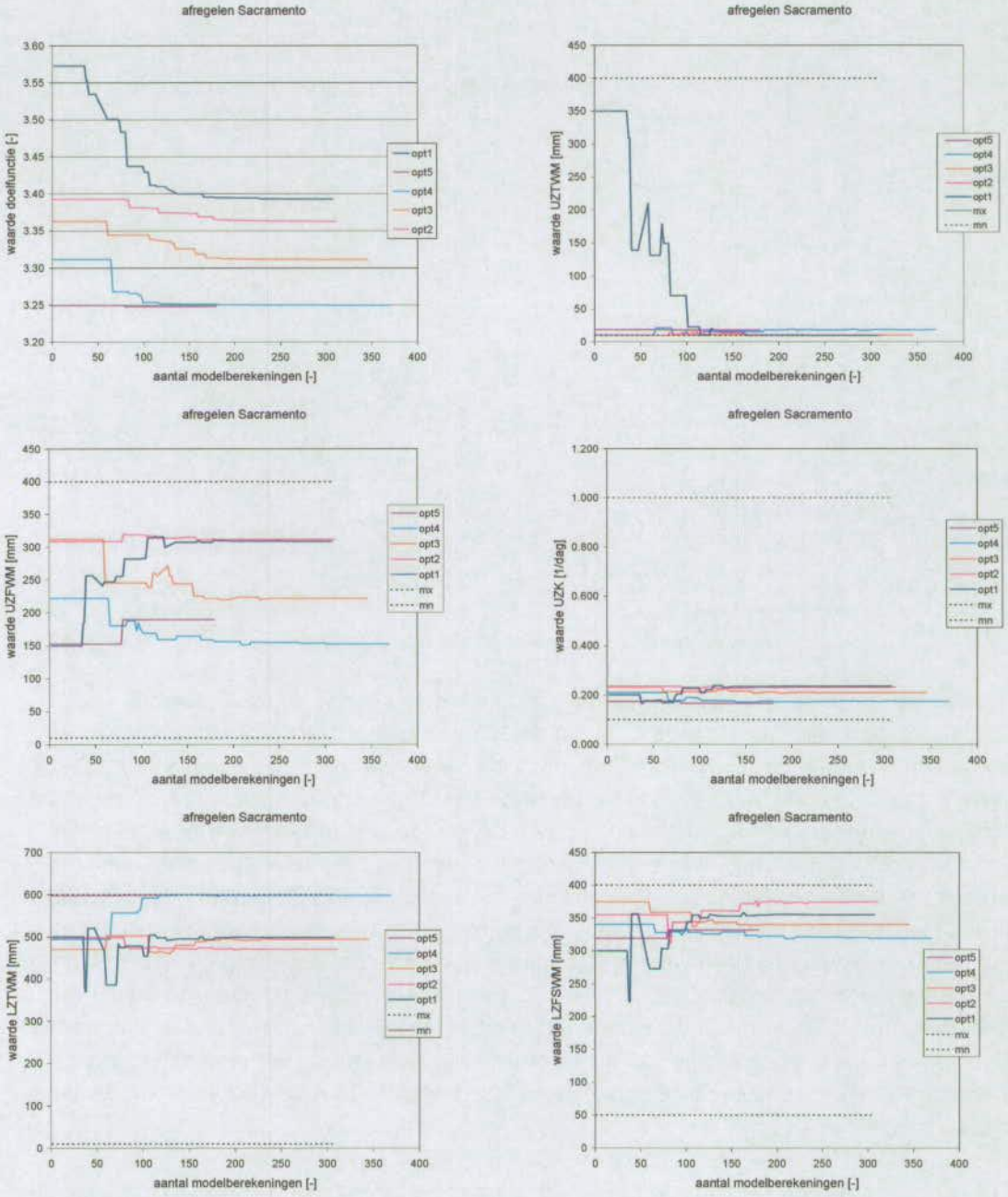
Figuur A-4: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie Isselburg.

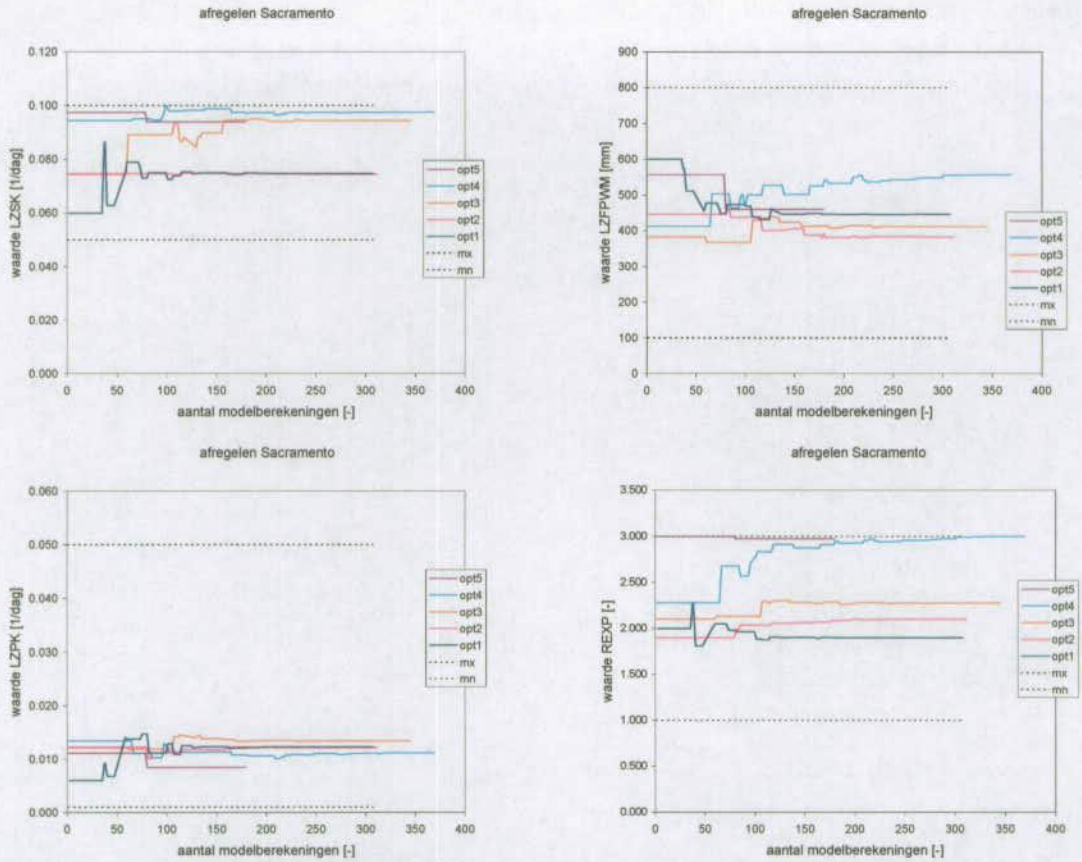
neerslag-afvoer relatie Isselburg			
Id	3		
Surface	25816 ha	UZTWM	348 mm
ZPERC		UZFWM	148 mm
PFREE	0,1	UZK	0,109 1/dag
RSERV	0,1	LZTWM	600 mm
PCTIM	0,05	LZFSWM	192 mm
ADIMP	0	LZSK	0,074 1/dag
SARVA	0,03	LZFPWM	461 mm
SIDE	0	LZPK	0,014 1/dag
SSOUT	0	REXP	3,0

Tabel A-3: Gecalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie Isselburg.

Kalibratie neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge

Ook voor het afregelen van de neerslag-afvoer relatie RHedebrugge zijn uurwaarden van alle kalibratie perioden uit Tabel A-1 gebruikt. In Figuur A-4 wordt een overzicht gegeven van het resultaat.

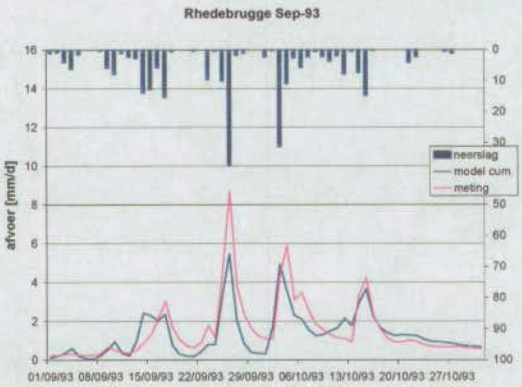


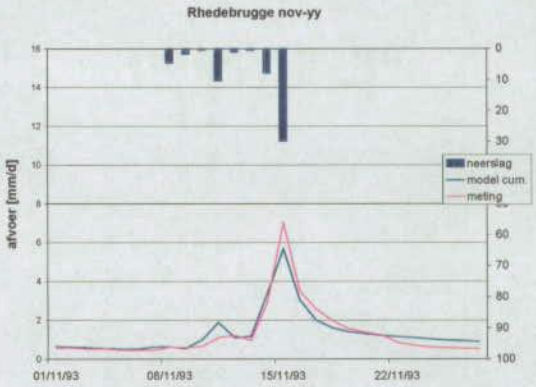


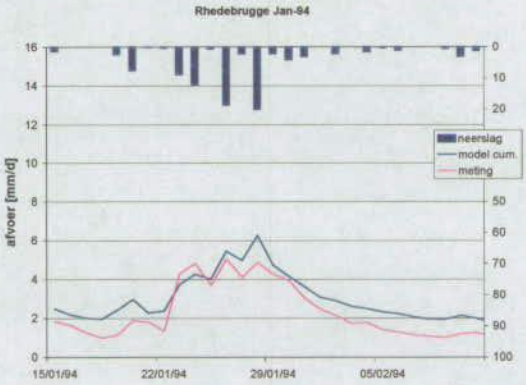
Figuur A-4: Overzicht van de kalibratie van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge.

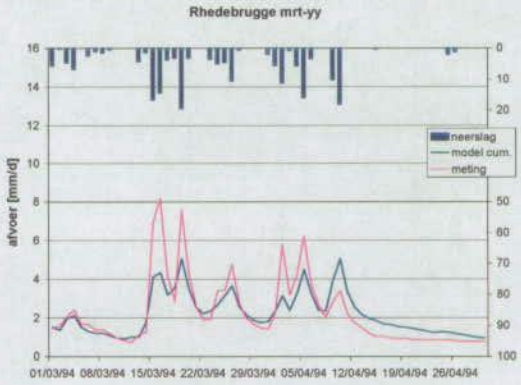
Uit de eerste grafiek van de figuur blijkt dat na de vierde optimatie de waarde van de doelfunctie nog nauwelijks verandert. Er zijn drie parameters, UZTWM, LZTWM en REXP. waarvan de waarde tegen de grens van de gestelde bandbreedte ligt. De waarde van UZTWM ligt dicht tegen de ondergrens van de bandbreedte aan. In het stroomgebied achter meetpunt Rhedebrugge ligt relatief veel akkerbouwgebied. De verdamping in een akkerbouwgebied is in de wintermaanden gering. In de simulatie wordt gerekend met referentie gewasverdamping, hierdoor wordt de verdamping in de wintermaanden overschat. Om de verdamping te reduceren wordt de waarde van UZTWM zo klein mogelijk gemaakt. De waarde van parameter LZTWM ligt dicht tegen de bovengrens aan van de gestelde bandbreedte. Dit duidt erop dat meer water in de *lower zone* voor transpiratie beschikbaar moet zijn. Net als bij als bij neerslag-afvoer relatie Isselburg wordt de waarde van deze parameter niet verder aangepast. De bovengrens wordt verondersteld al erg groot te zijn. Net als de ander twee neerslag-afvoer relaties blijkt dat paramater REXP een te kleine bovengrens heeft. De overige parameters blijven ruim binnen de gestelde bandbreedte.

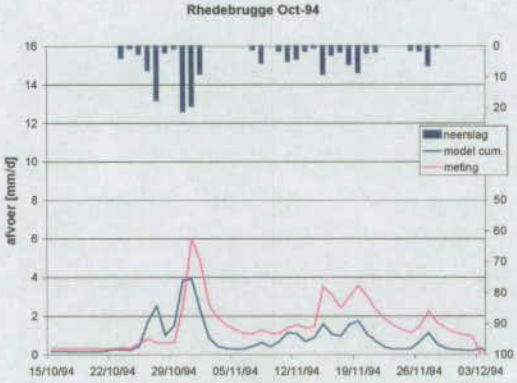
In Figuur A-5 staat een overzicht van de gesimuleerde perioden. Uit de grafieken blijkt dat de simulatie de metingen goed benadert. Het model lijkt de topafvoeren een beetje te onderschatten. De timing van de afvoergolven is goed gesimuleerd. Op basis van dit resultaat worden de parameters UZTWM, LZTWM en REXP niet verder aangepast.

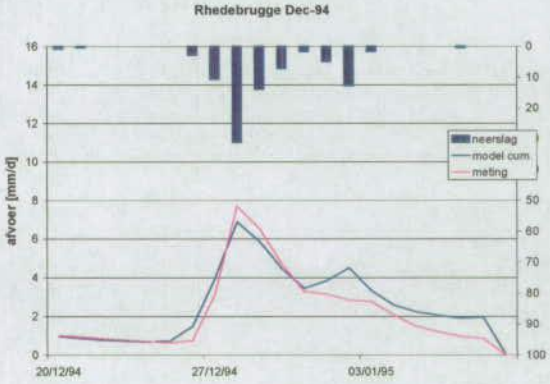

Rhedebrugge Sep-93
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
01/09/93 08/09/93 15/09/93 22/09/93 29/09/93 06/10/93 13/10/93 20/10/93 27/10/93

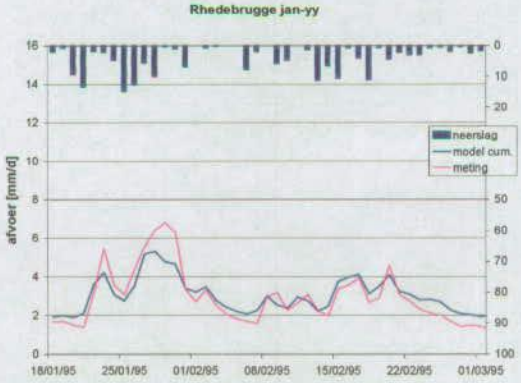

Rhedebrugge nov-yy
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
01/11/93 08/11/93 15/11/93 22/11/93

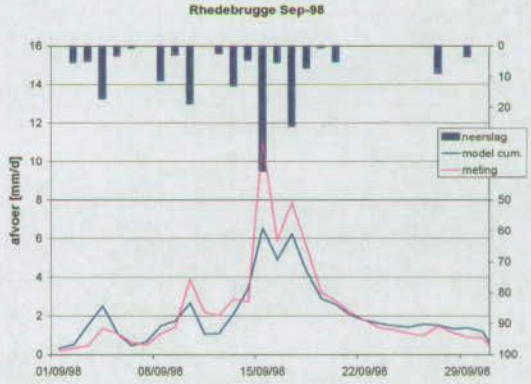

Rhedebrugge Jan-94
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
15/01/94 22/01/94 29/01/94 05/02/94

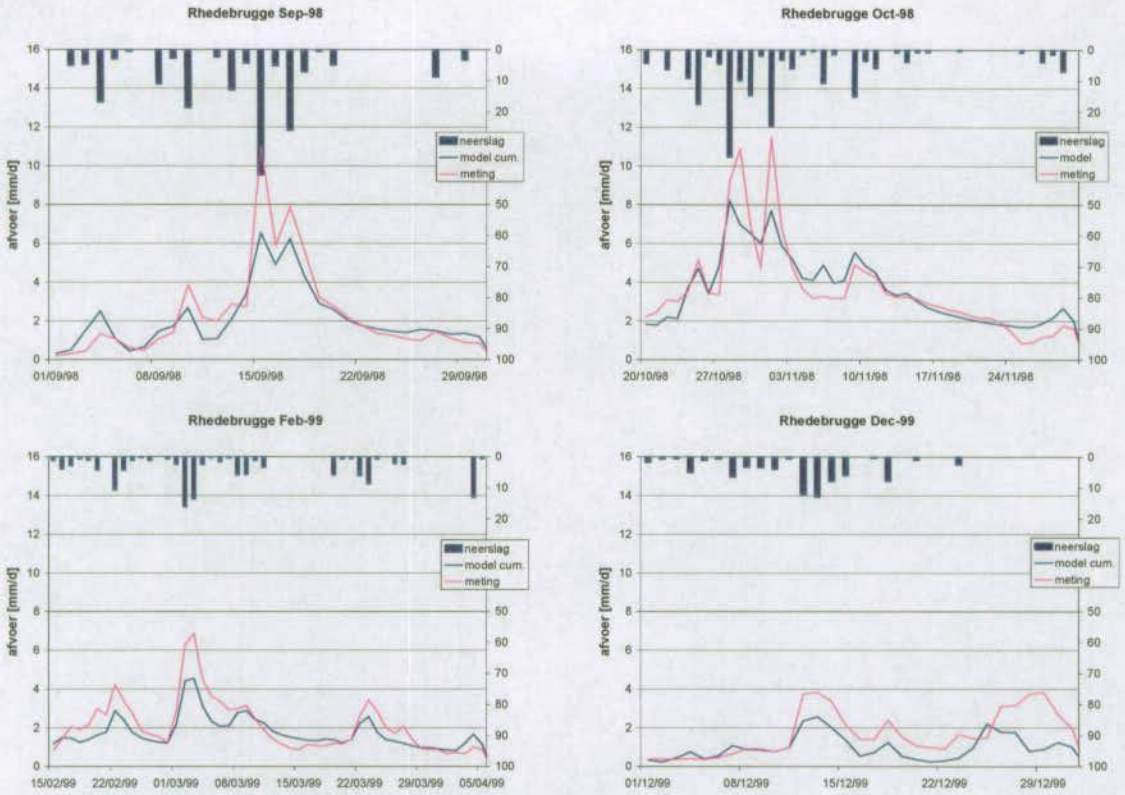

Rhedebrugge mrt-yy
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
01/03/94 08/03/94 15/03/94 22/03/94 29/03/94 05/04/94 12/04/94 19/04/94 26/04/94


Rhedebrugge Oct-94
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
15/10/94 22/10/94 29/10/94 05/11/94 12/11/94 19/11/94 26/11/94 03/12/94


Rhedebrugge Dec-94
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
20/12/94 27/12/94 03/01/95


Rhedebrugge jan-yy
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
18/01/95 25/01/95 01/02/95 08/02/95 15/02/95 22/02/95 01/03/95


Rhedebrugge Sep-98
afvoer [mm/d]
neerslag
model cum.
meting
01/09/98 08/09/98 15/09/98 22/09/98 29/09/98



Figuur A-5: Kalibratie resultaat van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge.

In Tabel A-4 is de parameter set van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge weergegeven.

neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge				
id	4			
Surface	24204	ha	UZTWM	10 mm
ZPERC	37		UZFWM	312 mm
PFREE	0.1		UZK	0.232 1/dag
RSERV	0.1		LZTWM	471 mm
PCTIM	0.05		LZFSWM	374 mm
ADIMP	0		LZSK	0.074 1/dag
SARVA	0.03		LZFPWM	383 mm
SIDE	0		LZPK	0.012 1/dag
SSOUT	0		REXP	2.9

Tabel A-4: Gecalibreerde parameter set van neerslag-afvoer relatie Rhedebrügge.

Vergelijking modelparameters voor de onderscheiden stroomgebieden

In de onderstaande tabel zijn de kalibratie parameters van de drie neerslag-afvoerrelaties opgenomen. Als de parameters onderling worden vergeleken dan blijkt de toplaag van het gebied Isselburg relatief veel water kan vasthouden (parameter UZTWM). De neerslag opgevangen in dit reservoir komt niet tot afvoer en zal niet percoleren, het verdwijnt via evapotranspiratie. In de *'lowerzone'* heeft de neerslag-afvoerrelatie van Isselburg ook relatief veel water beschikbaar voor evapotranspiratie (parameter LZTWM). De totale capaciteit van het capillaire water in de ongrond in het stroomgebied achter meetpunt Isselburg is 950 mm tegen respectievelijk 550 en 480 mm achter meetpunt de Pol en Rhedebrügge. Verondersteld wordt dat in het stroomgebied achter meetpunt Isselburg wegzijging optreedt. Een gedeelte van de gevallen neerslag (maximaal 300 tot 400 mm) zal via een andere route het stroomgebied verlaten.

Sacramento model		Neerslag-afvoerrelatie		
parameter	eenheid	de Pol	Isselburg	Rhedebrugge
Surface	ha	96146	25816	24204
ZPERC		27	39	37
PFREE		0.1	0.1	0.1
RSERV		0.1	0.1	0.1
PCTIM		0.05	0.05	0.05
ADIMP		0	0	0
SARVA		0.03	0.03	0.03
SIDE		0	0	0
SSOUT		0	0	0
UZTWM	mm	141	348	10
UZFWM	mm	201	148	312
UZK	1/dag	0.256	0.109	0.232
LZTWM	mm	415	600	471
LZFSWM	mm	357	192	374
LZSK	1/dag	0.097	0.074	0.074
LZFPWM	mm	333	461	383
LZPK	1/dag	0.015	0.014	0.012
REXP		3.0	3.0	2.9

Tabel A-5: Vergelijking tussen kalibratie parameters van de neerslag-afvoerrelaties de Pol, Isselbrug en Rhedebrügge.

De toplaag van het stroomgebied achter meetpunt Rhedebrügge heeft zeer weinig water capillair water. In dit hellende gebied zal veel water percoleren of tot afvoer komen. De totale hoeveelheid capillair water in de ondergrond (parameters UZTWM en LZTWM samen) is vergelijkbaar met de gemiddelde verdampingsvraag in Nederland. De totale hoeveelheid capillair water in het stroomgebied achter meetpunt de Pol is hier vergelijkbaar mee.

De capaciteit van het 'vrije' water in de ondergrond (parameters UZFWM, LZFSWM en LZFPWM samen) is het grootst in het stroomgebied achter meetpunt Rhedebrügge. Deze bergingscapaciteit is min of meer gelijk verdeeld over de toplaag, de snelreagerende laag en traag reagerende laag. Het stroomgebied achter meetpunt de Pol kan maximaal ongeveer 150 mm minder water bergen in de ondergrond. Deze kleinere capaciteit zit voornamelijk in een

geringere berging in de toplaag. Achter meetpunt Isselburg heeft de bodem de geringste bergingscapaciteit (ongeveer 800 mm). De traag reagerende laag bezit de grootste capaciteit. In de toplaag en de snelreagerende laag is de capaciteit ongeveer gelijk.

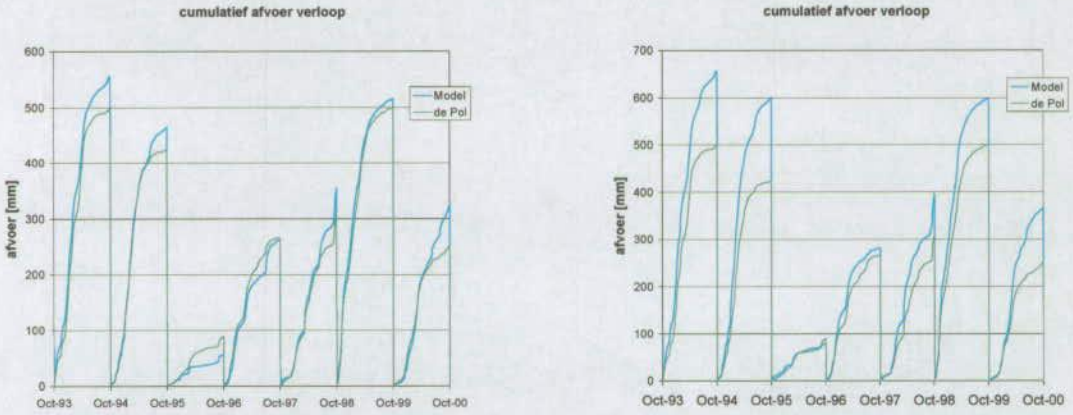
De drie afvoer relaties hebben min of meer dezelfde drainage weerstand voor de traag reagerende laag. De drainage weerstand van de snel reagerende laag van neerslag-afvoerrelatie de Pol wijkt af van de andere twee relaties. Parameter LZSK is bij de Pol het grootst. De weerstanden van de toplaag zijn bij de Pol en Rhedebrügge vergelijkbaar, de drainage weerstand van de toplaag achter meetpunt Isselburg is groot. Als de weerstanden van de drie lagen worden vergeleken dan blijkt dat in het vlakkere gebied achter meetpunt de Pol de neerslag eerst moet percoleren alvorens het tot afvoer komt. In het meer hellende gebied van Rhedebrügge komt relatief veel water tot afvoer in de toplaag. De drainage weerstanden van neerslag-afvoerrelatie Isselburg zullen waarschijnlijk beïnvloed zijn door het ontbreken van wegzijging in het model.

Bijlage B: Verificatie neerslag-afvoermodel

Het Sacramento model is getoetst op basis van het verloop van de afvoer gedurende de jaren 1993 tot en met 2000. Er zijn twee berekeningen met het model uitgevoerd. In de ene berekening is neerslag van het station Winterswijk gebruikt (zelfde als bij calibratie). In de andere berekening is neerslag van het station Arnhem gebruikt.

Verificatie neerslag-afvoer relatie stuw de Pol

In Figuur B-1 is het cumulatieve afvoerverloop in millimeters gedurende de jaren 1993 tot en met 2000 te zien. De afvoer is in hydrologische jaren (1-oktober t/m 30 september) uitgezet.



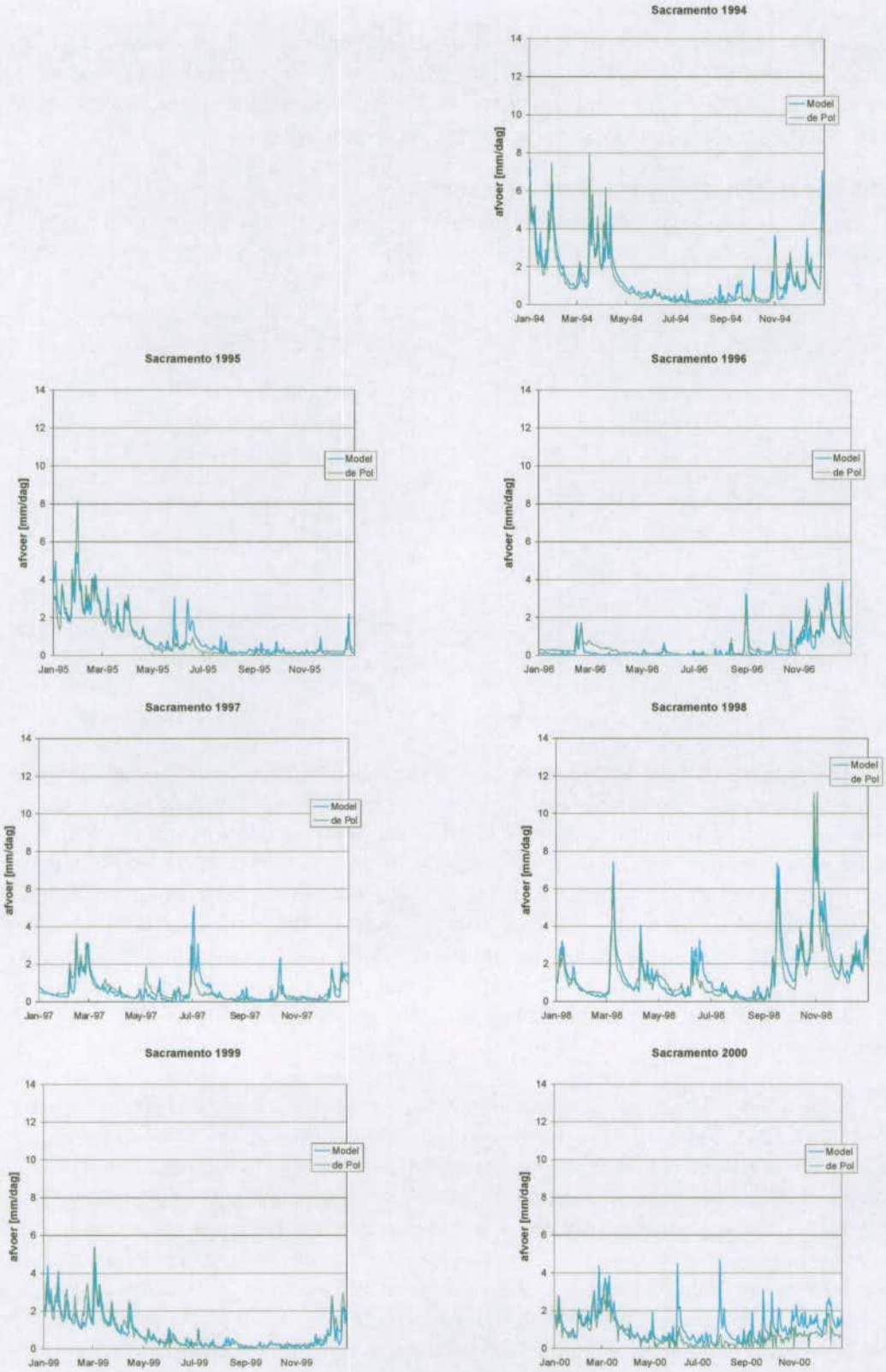
(a) neerslag Winterswijk (b) neerslag Arnhem

Figuur B-1: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol.

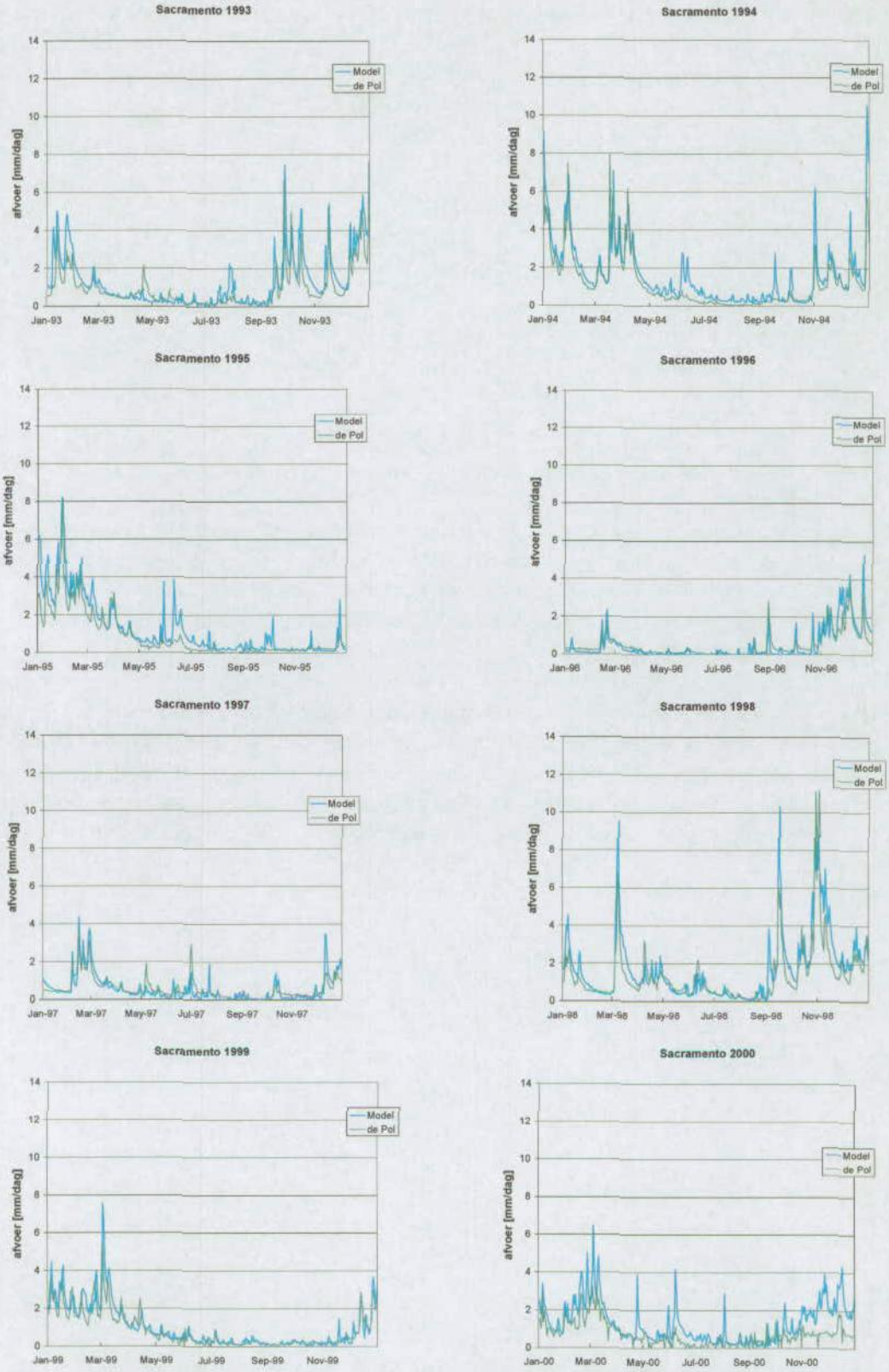
Uit de figuur blijkt dat bij gebruik van neerslag van station Winterswijk(97%) het model de gemeten afvoer goed volgt. Een slechter resultaat wordt verkregen als neerslag van het station Arnhem (3%) wordt gebruikt. In de natte jaren 93-94, 94-95 en 98-99 blijkt dat door gebruik van het station Arnhem de afvoer wordt overschat. In het droge jaar 95-96 wordt een beter resultaat verkregen wanneer station Arnhem wordt gebruikt. Verondersteld wordt dat in dit jaar in de simulatie de verdamping wordt overschat. Zoals uit de figuur blijkt is de afvoer in hydrologisch jaar 95-96 gering. Verondersteld kan worden dat de gewasverdamping dan wordt gereduceerd door uitdroging van de bodem. Dit wordt door het Sacramento model beperkt gesimuleerd. De extreme omstandigheden van 1995 worden door het model niet juist gereproduceerd.

In Figuur B-2 is te zien dat de simulatie het afvoer verloop gedurende het jaar in de jaren 1994, 1995, 1996, 1997, 1998 en 1999 goed volgt als de neerslag van Winterswijk wordt gebruikt. In de tweede helft van 2000 onstaat afwijkend gedrag. In de jaren 1995, 1997 en 1998 wordt in de zomer door het model sterker op de neerslag gereageerd dan in werkelijkheid het geval is. Figuur B-3 laat het verloop van de gesimuleerde afvoer zien als neerslag van Arnhem wordt gebruikt. In de figuur is te zien dat de zomer perioden van 1997 en 1998 niet sterk meer reageren op de gevallen neerslag. In juli 1995 wordt nog steeds sterk gereageerd op de neerslag. Doordat referentie gewasverdamping wordt gebruikt in plaats van de werkelijke potentiële gewasveramping, wordt de potentiële verdamping in de zomer onderschat. Dit kan de reden zijn voor het teveel aan gesimuleerde afvoer in de zomer van 1995. Omdat in deze studie

voornamelijk winterperioden moeten worden gesimuleerd wordt het model niet verder aangepast.



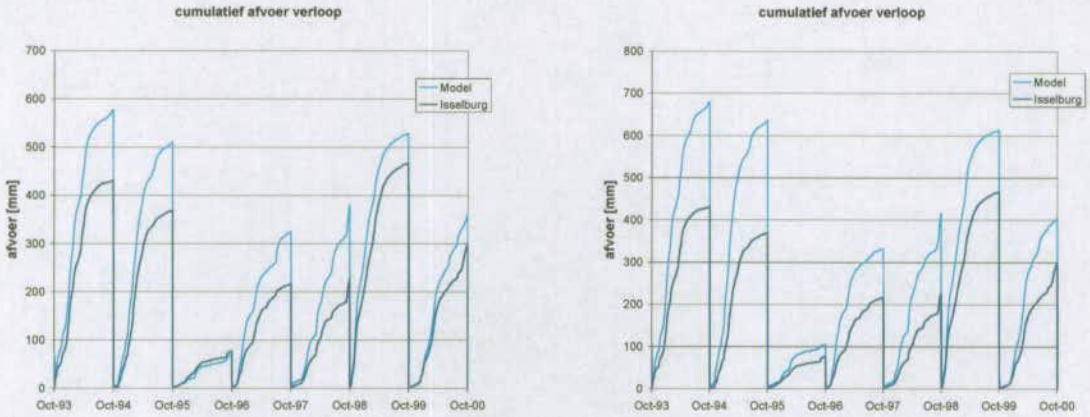
Figuur B-2: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk.



Figuur B-3: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie stuw de Pol gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem.

Verificatie neerslag-afvoer relatie Isselburg

In Figuur B-4 is het cumulatieve afvoerverloop in millimeters gedurende de jaren 1993 tot en met 2000 te zien. De afvoer is in hydrologische jaren (1-oktober t/m 30 september) uitgezet.

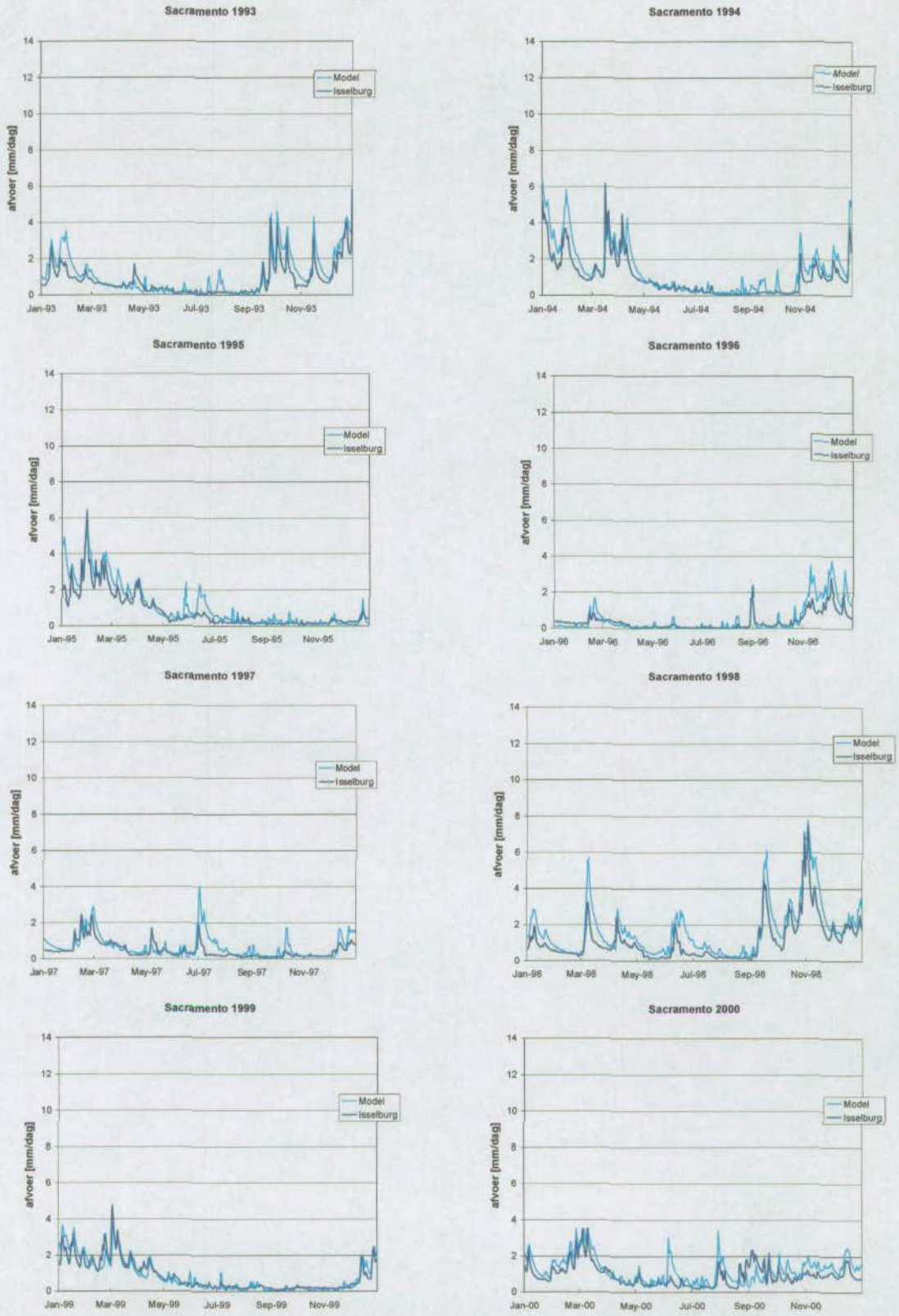


(a) neerslag Winterwijk (b) neerslag Arnhem

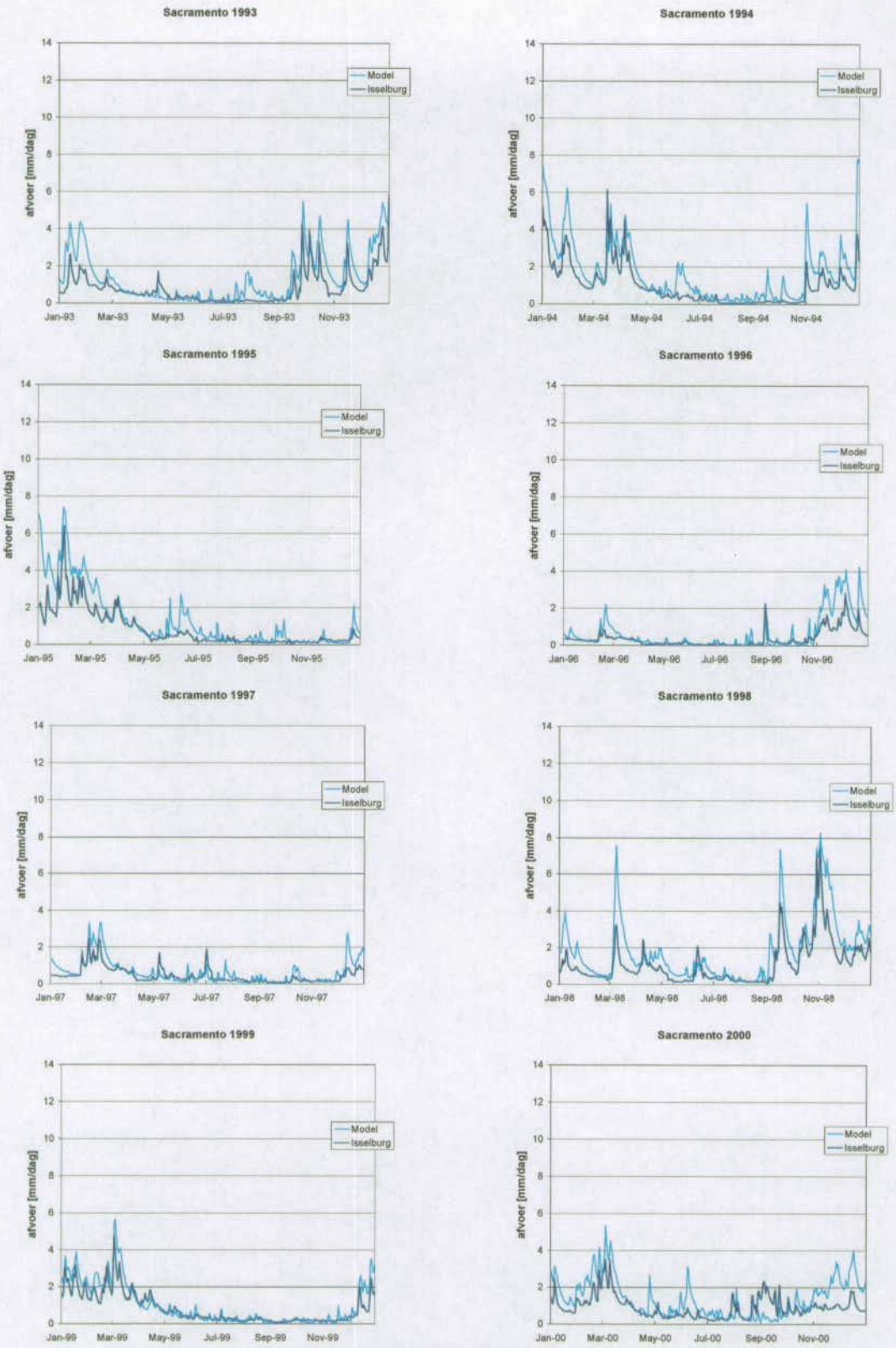
Figuur B-4: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg.

In de figuur is duidelijk te zien dat de afvoer door het model wordt overschat. Het ontbreekt echter aan duidelijk informatie over wegzijging en verdamping in het Duitse gedeelte van het stroomgebied. Gedetaileerde hoogtegegevens en karakteristieke waarden van grondwaterstanden zijn niet beschikbaar. In de onderhavige studie wordt daarom met de huidige modellering verder gewerkt.

In Figuur B-5 is te zien dat ondanks dat het model meer water afvoert, gedurende het jaar de gemeten afvoer redelijk wordt gevolgd. Voor deze figuur zijn de resultaten gebruikt van de berekening met neerslag van Winterswijk. Als neerslag van station Arnhem wordt gebruikt dan verslechtert het model gedrag. De jaren 1997 en 1999 zijn redelijk gesimuleerd. In de andere jaren is de modelfout groot. Zoals hierboven al is aangegeven wordt het model niet verder aangepast.



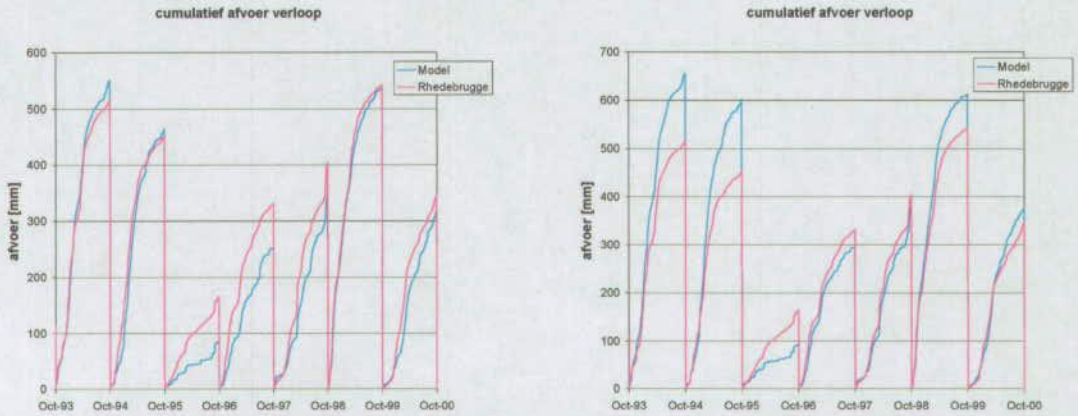
Figuur B-5: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk.



Figuur B-6: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Isselburg gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem.

Verificatie neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge

In Figuur B-7 is het cumulatieve afvoerverloop in millimeters gedurende de jaren 1993 tot en met 2000 bij Rhedebrugge te zien. De afvoer is in hydrologische jaren (1-oktober t/m 30 september) uitgezet.

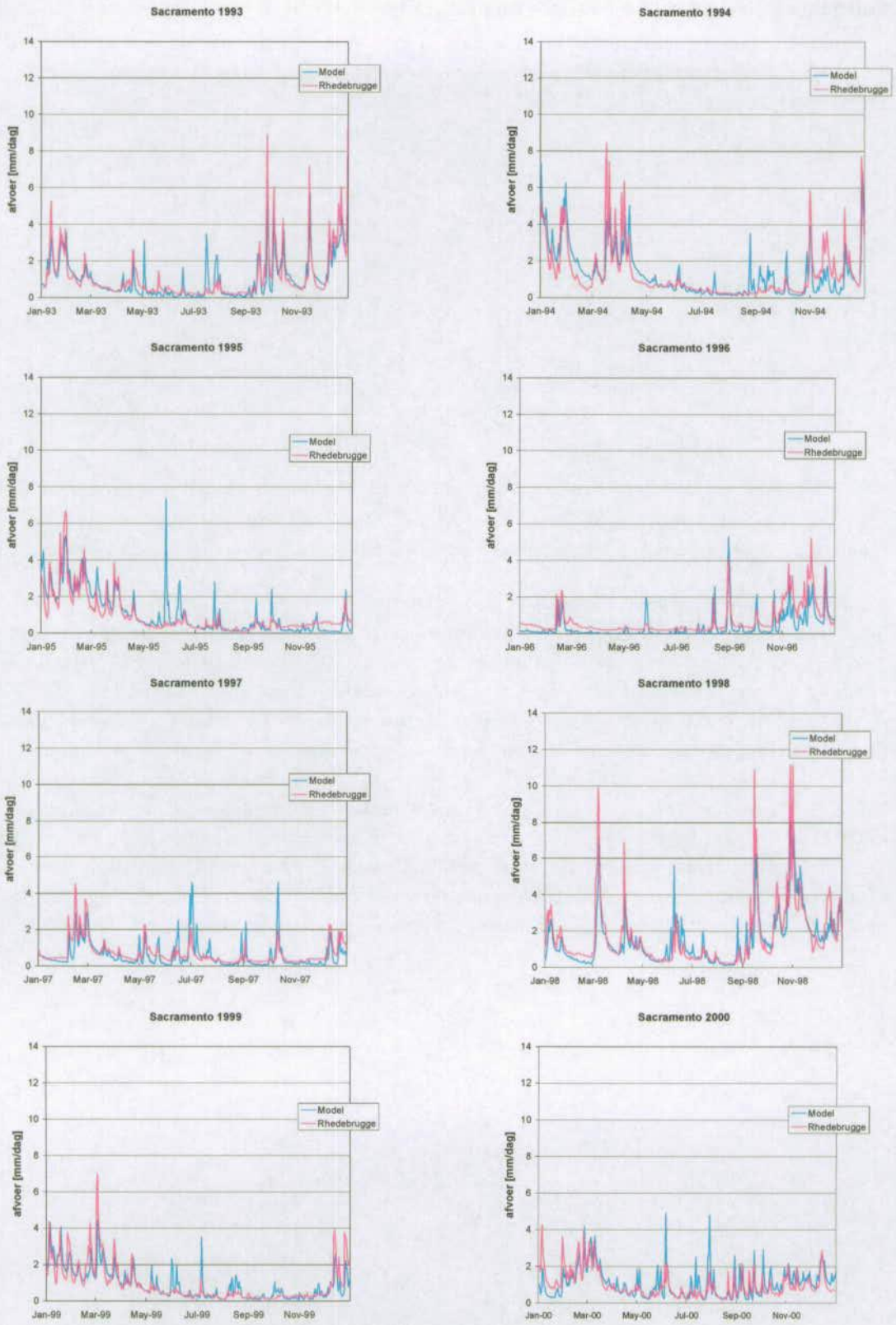


(a) neerslag Winterswijk (b) neerslag Arnhem

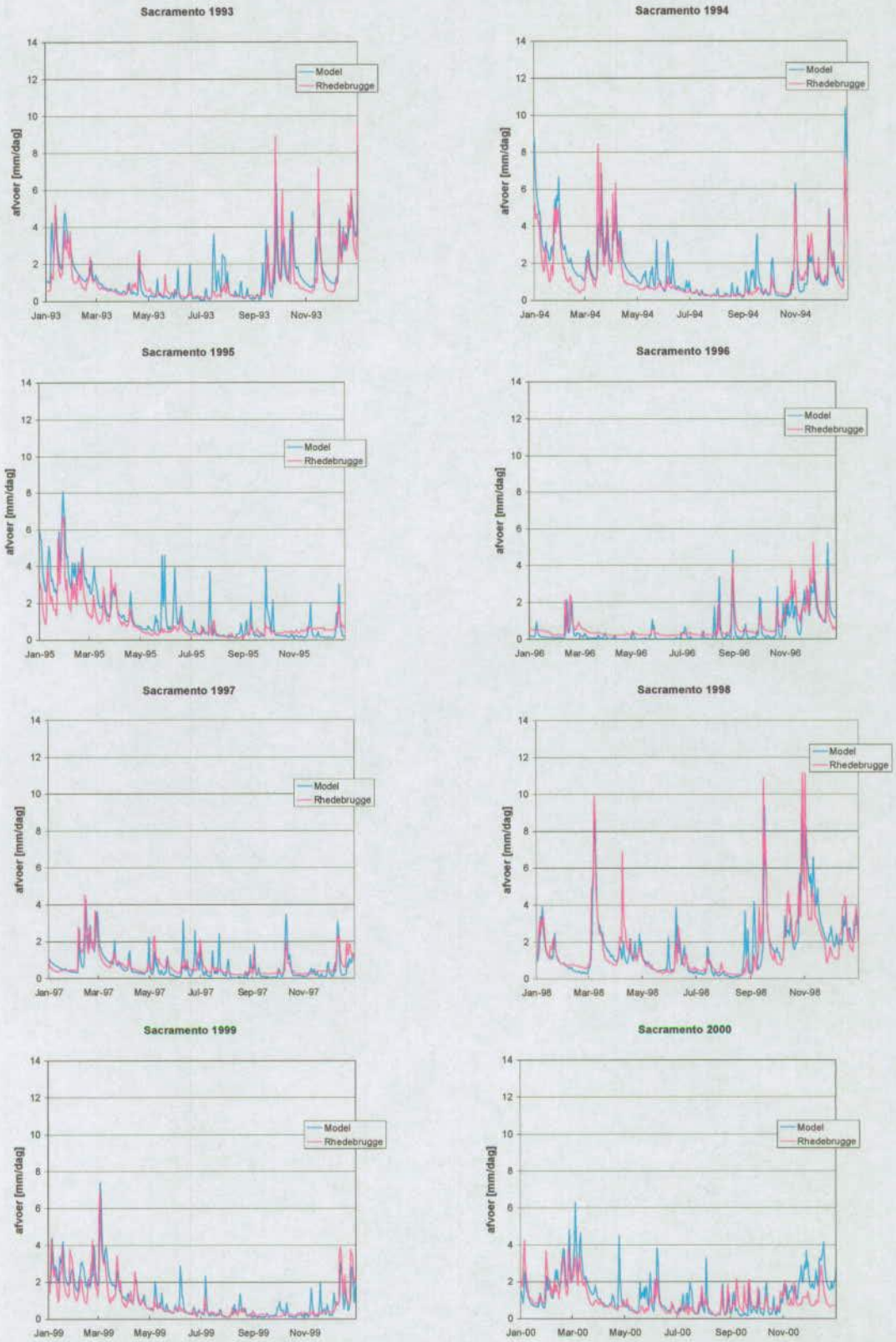
Figuur B-7: Toetsing van het cumulatieve afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge.

Als neerslag van het station winterswijk wordt gebruikt dan is de simulatie in de natte jaren 93-94, 94-95 en 98-99 goed. Door neeslag van Arnhem te gebruiken verbeterd de fit in de jaren 96-97 en 97-98. In de natte jaren wordt echter de afvoer bij Rhedebrugge sterk overschat als neerslag van Arnhem wordt gebruikt. De figuur laat duidelijk zien wat de invloed van de neerslag op het cumulatieve afvoer verloop is. Het is te zien dat het model op afvoergolven in de wintermaanden met neerslag van Winterswijk is afgeregeld.

Figuur B-8 en Figuur B-9 laten zien dat over het algemeen het model het verloop van de afvoer gedurende het jaar goed volgt. Opvallend is dat het moel tussen september 1995 en november 1996 nauwelijks afvoer genereerd. Dit is opvallend omdat in de jaren 1994 en 1999 wel een juist verloop onder droge omstandigheden wordt weergegeven. Verondersteld wordt dat dit gedrag te verbeteren is als meer informatie over wegzijging en verdamping beschikbaar is.



Figuur B-8: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge gedurende het jaar bij gebruik van station Winterswijk.



Figuur B-9: Toetsing afvoerverloop van neerslag-afvoer relatie Rhedebrugge gedurende het jaar bij gebruik van station Arnhem

Bijlage C: Basisgegevens samenhang afvoergolven

Hoog water	Oude IJssel (de Pol) Qtop (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) Qtop (m3/s)	datum	fase-verschil (uren)
1901-02	29	18/05/1902 12:00	39	18/05/1902 14:00	2.00
1902-03	37	06/01/1903 12:00	49	06/01/1903 13:00	1.00
1903-04	46	21/02/1904 12:00	62	21/02/1904 14:00	2.00
1904-05	15	28/03/1905 12:00	19	28/03/1905 14:00	2.00
1905-06	29	02/03/1906 12:00	39	02/03/1906 13:00	1.00
1906-07	13	20/03/1907 12:00	17	20/03/1907 13:00	1.00
1907-08	4	25/05/1908 23:00	6	26/05/1908 03:00	4.00
1908-09	18	04/02/1909 13:00	26	04/02/1909 16:00	3.00
1909-10	31	27/02/1910 12:00	40	27/02/1910 13:00	1.00
1910-11	13	11/11/1910 12:00	18	11/11/1910 12:00	0.00
1911-12	18	09/01/1912 12:00	23	09/01/1912 14:00	2.00
1912-13	37	02/02/1913 12:00	51	02/02/1913 13:00	1.00
1913-14	48	16/03/1914 13:00	63	16/03/1914 16:00	3.00
1914-15	46	08/01/1915 12:00	64	08/01/1915 13:00	1.00
1915-16	49	19/02/1916 12:00	64	19/02/1916 12:00	0.00
1916-17	49	30/12/1916 12:00	67	30/12/1916 13:00	1.00
1917-18	72	17/01/1918 12:00	91	17/01/1918 13:00	1.00
1918-19	38	02/01/1919 12:00	49	02/01/1919 13:00	1.00
1919-20	56	14/01/1920 12:00	73	14/01/1920 11:00	-1.00
1920-21	20	27/01/1921 12:00	26	27/01/1921 13:00	1.00
1921-22	18	27/04/1922 12:00	25	27/04/1922 10:00	-2.00
1922-23	54	02/02/1923 12:00	72	02/02/1923 13:00	1.00
1923-24	21	04/05/1924 12:00	27	04/05/1924 13:00	1.00
1924-25	30	02/11/1924 12:00	39	02/11/1924 12:00	0.00
1925-26	37	02/01/1926 12:00	46	02/01/1926 12:00	0.00
1926-27	58	08/04/1927 12:00	79	08/04/1927 13:00	1.00
1927-28	50	16/02/1928 12:00	66	16/02/1928 13:00	1.00
1928-29	28	29/11/1929 12:00	39	29/11/1929 14:00	2.00
1929-30	8	18/05/1930 22:00	14	19/05/1930 00:00	2.00
1930-31	72	23/11/1930 11:00	91	23/11/1930 13:00	2.00
1931-32	54	07/01/1932 12:00	71	07/01/1932 13:00	1.00
1932-33	48	31/10/1932 12:00	63	31/10/1932 13:00	1.00
1933-34	29	19/01/1934 12:00	38	19/01/1934 13:00	1.00
1934-35	22	04/02/1935 12:00	29	04/02/1935 14:00	2.00
1935-36	35	10/01/1936 12:00	47	10/01/1936 13:00	1.00
1936-37	38	24/02/1937 11:00	49	24/02/1937 12:00	1.00
1937-38	57	14/01/1938 12:00	75	14/01/1938 12:00	0.00
1938-39	35	18/01/1939 12:00	45	18/01/1939 13:00	1.00

Hoog water	Oude IJssel (de Pol) Qtop (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) Qtop (m3/s)	datum	fase-verschil (uren)
1939-40	93	28/11/1939 12:00	115	28/11/1939 13:00	1.00
1940-41	45	21/01/1941 12:00	61	21/01/1941 13:00	1.00
1941-42	13	18/03/1942 14:00	20	18/03/1942 16:00	2.00
1942-43	31	14/01/1943 12:00	42	14/01/1943 14:00	2.00
1943-44	53	05/02/1944 13:00	40	05/02/1944 12:00	-1.00
1944-45	46	13/02/1945 12:00	59	13/02/1945 13:00	1.00
1945-46	125	09/02/1946 12:00	150	09/02/1946 13:00	1.00
1946-47	53	14/03/1947 12:00	71	14/03/1947 13:00	1.00
1947-48	42	02/01/1948 12:00	51	02/01/1948 12:00	0.00
1948-49	13	18/03/1949 12:00	18	18/03/1949 15:00	3.00
1949-50	56	14/02/1950 12:00	74	14/02/1950 12:00	0.00
1950-51	37	20/01/1951 11:00	48	20/01/1951 12:00	1.00
1951-52	18	30/03/1952 12:00	27	30/03/1952 14:00	2.00
1952-53	24	20/12/1952 12:00	30	20/12/1952 14:00	2.00
1953-54	49	25/08/1954 12:00	64	25/08/1954 13:00	1.00
1954-55	62	17/01/1955 11:00	82	17/01/1955 12:00	1.00
1955-56	46	04/03/1956 11:00	62	04/03/1956 12:00	1.00
1956-57	41	24/02/1957 11:00	54	24/02/1957 12:00	1.00
1957-58	61	26/02/1958 11:00	79	26/02/1958 12:00	1.00
1958-59	48	07/01/1959 12:00	63	07/01/1959 14:00	2.00
1959-60	16	27/02/1960 11:00	21	27/02/1960 12:00	1.00
1960-61	88	30/01/1961 11:00	110	30/01/1961 12:00	1.00
1961-62	15	31/03/1962 12:00	21	31/03/1962 13:00	1.00
1962-63	23	14/03/1963 11:00	30	14/03/1963 13:00	2.00
1963-64	88	19/11/1963 11:00	110	19/11/1963 12:00	1.00
1964-65	26	26/03/1965 11:00	34	26/03/1965 12:00	1.00
1965-66	87	03/01/1966 11:00	109	03/01/1966 12:00	1.00
1966-67	103	13/12/1966 11:00	126	13/12/1966 12:00	1.00
1967-68	42	18/01/1968 11:00	55	18/01/1968 12:00	1.00
1968-69	54	02/10/1968 12:00	70	02/10/1968 15:00	3.00
1969-70	70	22/02/1970 11:00	91	22/02/1970 13:00	2.00
1970-71	40	27/01/1971 11:00	53	27/01/1971 12:00	1.00
1971-72	26	02/07/1972 11:00	34	02/07/1972 12:00	1.00
1972-73	35	21/11/1972 11:00	47	21/11/1972 12:00	1.00
1973-74	38	09/02/1974 12:00	52	09/02/1974 13:00	1.00
1974-75	54	17/12/1974 12:00	72	17/12/1974 13:00	1.00
1975-76	28	21/01/1976 11:00	37	21/01/1976 12:00	1.00
1976-77	15	21/02/1977 11:00	18	21/02/1977 14:00	3.00
1977-78	4	23/05/1978 10:00	6	23/05/1978 14:00	4.00
1978-79	43	16/03/1979 11:00	57	16/03/1979 12:00	1.00
1979-80	69	06/02/1980 11:00	88	06/02/1980 12:00	1.00
1980-81	71	14/03/1981 11:00	90	14/03/1981 11:00	0.00
1981-82	49	06/01/1982 11:00	63	06/01/1982 11:00	0.00

Hoog water	Oude IJssel (de Pol) Qtop (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) Qtop (m3/s)	datum	fase-verschil (uren)
1982-83	80	26/05/1983 11:00	103	26/05/1983 12:00	1.00
1983-84	87	07/02/1984 11:00	110	07/02/1984 12:00	1.00
1984-85	74	24/11/1984 11:00	94	24/11/1984 12:00	1.00
1985-86	55	25/01/1986 10:00	71	25/01/1986 11:00	1.00
1986-87	86	02/01/1987 11:00	107	02/01/1987 12:00	1.00
1987-88	48	27/03/1988 11:00	60	27/03/1988 11:00	0.00
1988-89	32	04/12/1988 11:00	43	04/12/1988 12:00	1.00
1989-90	46	16/02/1990 10:00	59	16/02/1990 12:00	2.00
1990-91	76	03/01/1991 11:00	97	03/01/1991 13:00	2.00
1991-92	72	22/12/1991 11:00	92	22/12/1991 12:00	1.00
1992-93	54	12/01/1993 10:00	69	12/01/1993 11:00	1.00
1993-94	66	23/12/1993 11:00	83	23/12/1993 10:00	-1.00
1994-95	91	28/01/1995 11:00	112	28/01/1995 12:00	1.00
1995-96	37	23/12/1995 11:00	51	23/12/1995 11:00	0.00
1996-97	40	27/02/1997 10:00	52	27/02/1997 11:00	1.00
1997-98	113	15/09/1998 11:00	139	15/09/1998 12:00	1.00
1998-99	99	01/11/1998 11:00	121	01/11/1998 12:00	1.00
1999-00	37	26/12/1999 11:00	48	26/12/1999 16:00	5.00
gem.	46		60		1.17
stdev.	25		31		1.01

Tabel C-1: Samenhang tussen afvoergolven op de Oude IJssel bij de Pol en Doesburg.

Hoog water	Rijn (Lobith) topafvoer (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) topafvoer (m3/s)	datum	fase-verschil (dagen)	afvoer OIJ bij passage (m3/s)	looptijd Lobith-monding OIJ (uren)
1901-02	4815	24/05/1902 12:00	39	18/05/1902 14:00	5.92	7	17
1902-03	5460	09/01/1903 12:00	49	06/01/1903 13:00	2.96	20	11
1903-04	5805	25/02/1904 12:00	62	21/02/1904 14:00	3.92	27	6
1904-05	3500	02/04/1905 12:00	19	28/03/1905 14:00	4.92	5	23
1905-06	6420	07/03/1906 12:00	39	02/03/1906 13:00	4.96	13	8
1906-07	5865	24/03/1907 12:00	17	20/03/1907 13:00	3.96	6	10
1907-08	4815	30/05/1908 12:00	6	26/05/1908 03:00	4.38	5	6
1908-09	5745	08/02/1909 12:00	26	04/02/1909 16:00	3.83	7	13
1909-10	6605	02/03/1910 12:00	40	27/02/1910 13:00	2.96	20	11
1910-11	6365	15/11/1910 12:00	18	11/11/1910 12:00	4.00	3	10
1911-12	5320	14/01/1912 12:00	23	09/01/1912 14:00	4.92	6	8
1912-13	5150	06/02/1913 12:00	51	02/02/1913 13:00	3.96	17	10
1913-14	7475	19/03/1914 12:00	63	16/03/1914 16:00	2.83	34	21
1914-15	6230	13/01/1915 12:00	64	08/01/1915 13:00	4.96	46	10
1915-16	6955	23/02/1916 12:00	64	19/02/1916 12:00	4.00	35	13
1916-17	7475	06/01/1917 12:00	67	30/12/1916 13:00	6.96	29	12
1917-18	7750	21/01/1918 12:00	91	17/01/1918 13:00	3.96	37	13
1918-19	7075	04/01/1919 12:00	49	02/01/1919 13:00	1.96	36	29
1919-20	11365	18/01/1920 12:00	73	14/01/1920 11:00	4.04	37	13
1920-21	2800	31/01/1921 12:00	26	27/01/1921 13:00	3.96	13	12
1921-22	6090	03/05/1922 12:00	25	27/04/1922 10:00	6.08	5	11
1922-23	6210	06/02/1923 12:00	72	02/02/1923 13:00	3.96	21	27
1923-24	6715	08/05/1924 12:00	27	04/05/1924 13:00	3.96	9	4
1924-25	9300	07/11/1924 12:00	39	02/11/1924 12:00	5.00	15	28
1925-26	12280	04/01/1926 12:00	46	02/01/1926 12:00	2.00	36	7
1926-27	5200	12/04/1927 12:00	79	08/04/1927 13:00	3.96	23	8
1927-28	6490	21/02/1928 12:00	66	16/02/1928 13:00	4.96	25	9
1928-29	5490	30/11/1929 12:00	39	29/11/1929 14:00	0.92	17	8
1929-30	4570	21/05/1930 12:00	14	19/05/1930 00:00	2.50	1	10
1930-31	9075	27/11/1930 12:00	91	23/11/1930 13:00	3.96	46	23
1931-32	5820	12/01/1932 12:00	71	07/01/1932 13:00	4.96	21	9
1932-33	4440	03/11/1932 12:00	63	31/10/1932 13:00	2.96	38	5
1933-34	2905	21/01/1934 12:00	38	19/01/1934 13:00	1.96	4	56
1934-35	5820	09/02/1935 12:00	29	04/02/1935 14:00	4.92	13	25
1935-36	5895	18/01/1936 12:00	47	10/01/1936 13:00	7.96	34	11
1936-37	7365	28/02/1937 12:00	49	24/02/1937 12:00	4.00	42	11
1937-38	5000	17/01/1938 12:00	75	14/01/1938 12:00	3.00	51	9
1938-39	5925	22/01/1939 12:00	45	18/01/1939 13:00	3.96	28	25
1939-40	8610	03/12/1939 12:00	115	28/11/1939 13:00	4.96	51	11
1940-41	7940	30/01/1941 12:00	61	21/01/1941 13:00	8.96	16	10
1941-42	8475	23/03/1942 12:00	20	18/03/1942 16:00	4.83	6	27
1942-43	3220	18/01/1943 12:00	42	14/01/1943 14:00	3.92	19	27
1943-44	3725	09/02/1944 12:00	40	05/02/1944 12:00	4.00	37	2

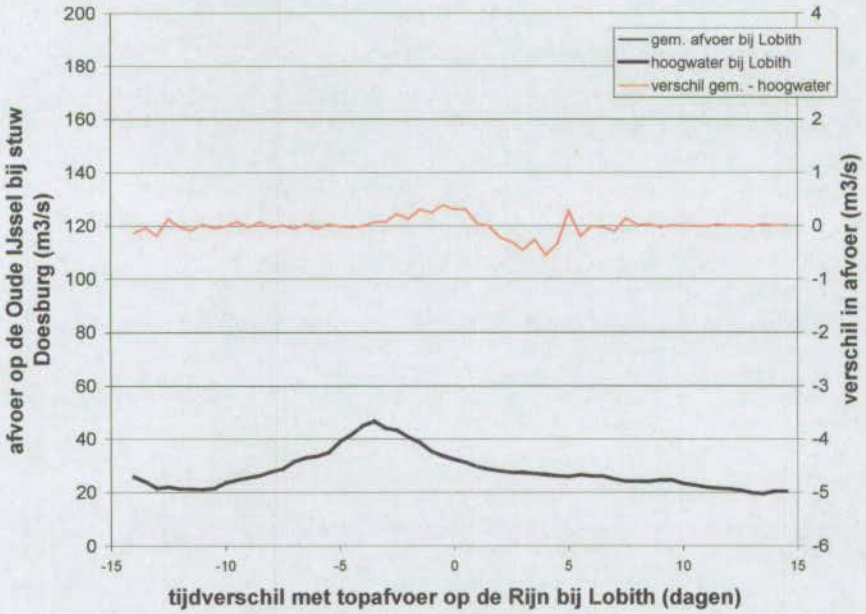
Hoog water	Rijn (Lobith) topafvoer (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) topafvoer (m3/s)	datum	fase-verschil (dagen)	afvoer OIJ bij passage (m3/s)	looptijd Lobith-monding OIJ (uren)
1944-45	8585	17/02/1945 12:00	59	13/02/1945 13:00	3.96	33	30
1945-46	9140	12/02/1946 12:00	150	09/02/1946 13:00	2.96	70	20
1946-47	5910	16/03/1947 12:00	71	14/03/1947 13:00	1.96	26	23
1947-48	9785	04/01/1948 12:00	51	02/01/1948 12:00	2.00	25	14
1948-49	2790	21/03/1949 12:00	18	18/03/1949 15:00	2.88	7	5
1949-50	4440	16/02/1950 12:00	74	14/02/1950 12:00	2.00	42	4
1950-51	*6620*	*25/01/1951 12:00*	*48*	*20/01/1951 12:00*	*5.00*	*27*	*10*
1951-52	7165	03/04/1952 12:00	27	30/03/1952 14:00	3.92	10	20
1952-53	7605	27/12/1952 12:00	30	20/12/1952 14:00	6.92	33	5
1953-54	3365	29/08/1954 12:00	64	25/08/1954 13:00	3.96	16	25
1954-55	9510	21/01/1955 12:00	82	17/01/1955 12:00	4.00	33	18
1955-56	7610	08/03/1956 12:00	62	04/03/1956 12:00	4.00	29	11
1956-57	6905	03/03/1957 12:00	54	24/02/1957 12:00	7.00	22	5
1957-58	9120	01/03/1958 12:00	79	26/02/1958 12:00	3.00	31	31
1958-59	5295	12/01/1959 12:00	63	07/01/1959 14:00	4.92	52	9
1959-60	3255	02/03/1960 12:00	21	27/02/1960 12:00	4.00	8	26
1960-61	5606	05/02/1961 12:00	110	30/01/1961 12:00	6.00	47	26
1961-62	5774	05/04/1962 12:00	21	31/03/1962 13:00	4.96	25	10
1962-63	3607	15/03/1963 12:00	30	14/03/1963 13:00	0.96	11	23
1963-64	5204	25/11/1963 12:00	110	19/11/1963 12:00	6.00	35	3
1964-65	6044	30/03/1965 12:00	34	26/03/1965 12:00	4.00	11	5
1965-66	7422	06/01/1966 12:00	109	03/01/1966 12:00	3.00	52	7
1966-67	7318	16/12/1966 12:00	126	13/12/1966 12:00	3.00	67	14
1967-68	7334	20/01/1968 12:00	55	18/01/1968 12:00	2.00	36	9
1968-69	5616	05/10/1968 12:00	70	02/10/1968 15:00	2.88	35	26
1969-70	9850	27/02/1970 12:00	91	22/02/1970 13:00	4.96	32	14
1970-71	3633	31/01/1971 12:00	53	27/01/1971 12:00	4.00	31	6
1971-72	2228	05/07/1972 12:00	34	02/07/1972 12:00	3.00	7	0
1972-73	4931	23/11/1972 12:00	47	21/11/1972 12:00	2.00	28	27
1973-74	4005	12/02/1974 12:00	52	09/02/1974 13:00	2.96	24	13
1974-75	5904	21/12/1974 12:00	72	17/12/1974 13:00	3.96	39	18
1975-76	3459	27/01/1976 12:00	37	21/01/1976 12:00	6.00	25	11
1976-77	6279	24/02/1977 12:00	18	21/02/1977 14:00	2.92	11	20
1977-78	6341	29/05/1978 12:00	6	23/05/1978 14:00	5.92	3	5
1978-79	*6980*	*18/03/1979 12:00*	*57*	*16/03/1979 12:00*	*2.00*	*32*	*5*
1979-80	8811	09/02/1980 12:00	88	06/02/1980 12:00	3.00	37	30
1980-81	6597	17/03/1981 12:00	90	14/03/1981 11:00	3.04	57	9
1981-82	7931	10/01/1982 12:00	63	06/01/1982 11:00	4.04	24	6
1982-83	9707	31/05/1983 12:00	103	26/05/1983 12:00	5.00	33	26
1983-84	8697	11/02/1984 12:00	110	07/02/1984 12:00	4.00	44	21
1984-85	4915	27/11/1984 12:00	94	24/11/1984 12:00	3.00	34	11
1985-86	6194	28/01/1986 12:00	71	25/01/1986 11:00	3.04	45	6
1986-87	7642	06/01/1987 12:00	107	02/01/1987 12:00	4.00	79	5

Hoog water	Rijn (Lobith) topafvoer (m3/s)	datum	Oude IJssel (Doesburg) topafvoer (m3/s)	datum	fase-verschil (dagen)	afvoer OIJ bij passage (m3/s)	looptijd Lobith-monding OIJ (uren)
1987-88	10274	30/03/1988 12:00	60	27/03/1988 11:00	3.04	41	19
1988-89	5281	10/12/1988 12:00	43	04/12/1988 12:00	6.00	26	9
1989-90	7028	20/02/1990 12:00	59	16/02/1990 12:00	4.00	31	7
1990-91	6712	07/01/1991 12:00	97	03/01/1991 13:00	3.96	59	8
1991-92	5383	26/12/1991 12:00	92	22/12/1991 12:00	4.00	35	15
1992-93	5735	15/01/1993 12:00	69	12/01/1993 11:00	3.04	33	16
1993-94	10940	25/12/1993 12:00	83	23/12/1993 10:00	2.08	62	16
1994-95	11885	31/01/1995 12:00	112	28/01/1995 12:00	3.00	71	26
1995-96	4112	30/12/1995 12:00	51	23/12/1995 11:00	7.04	4	5
1996-97	6926	02/03/1997 12:00	52	27/02/1997 11:00	3.04	26	16
1997-98	3885	19/09/1998 12:00	139	15/09/1998 12:00	4.00	54	6
1998-99	9413	04/11/1998 12:00	121	01/11/1998 12:00	3.00	79	19
1999-00	6604	30/12/1999 12:00	48	26/12/1999 16:00	3.83	31	27
gem.	6453		60		3.97	29	14
stdev.	2103		31		1.44	18	9

Tabel C-2: Samenhang tussen afvoergolven op de Rijn bij Lobith en de Oude IJssel bij Doesburg.

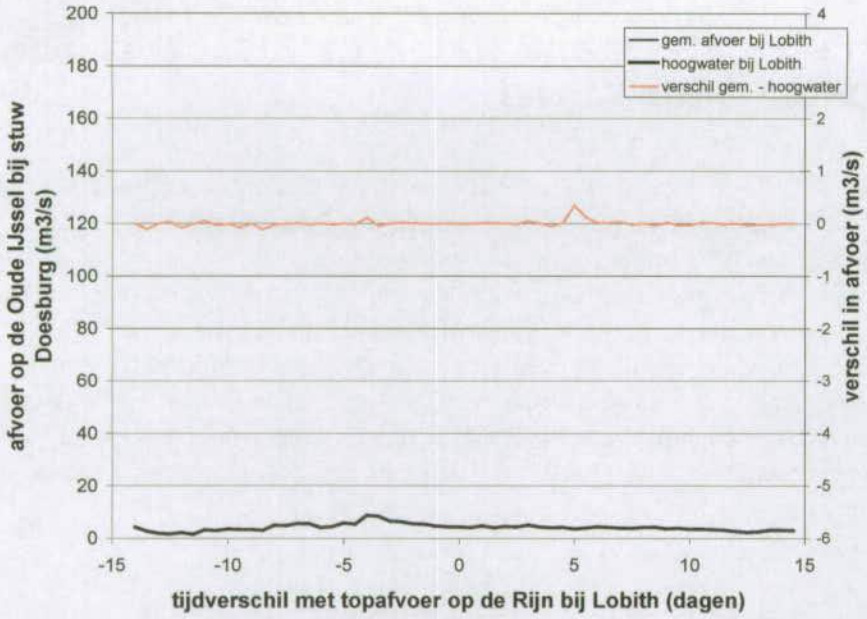
Bijlage D: Effect waterstand Gelderse IJssel op afvoer Oude IJssel

Met het gekoppelde Sobek-RE model van de Rijntakken en de Oude IJssel zijn 100 hoogwater perioden doorgerekend. In deze berekeningen is het debiet op de Rijn aangepast. Op de Oude IJssel treedt het hoogwater op en bij Lobith is gedurende de gehele periode een afvoer van 2300 m3/s opgelegd. Deze berekeningen zijn uitgevoerd om de invloed van hoge waterstanden op de Gelderse IJssel op de afvoer van de Oude IJssel inzichtelijk te maken. De afvoer bij Doesburg is geanalyseerd. Het gemiddelde afvoerverloop gedurende de hoogwater perioden is vastgesteld. Dit afvoerverloop wordt in de onderstaande figuur vergeleken met het gemiddelde afvoerverloop op de Oude IJssel, waarbij op de Gelderse IJssel een hoogwatergolf optreedt. Uit de figuur blijkt dat de waterstand op de Gelderse IJssel een geringe invloed heeft op de afvoer van de Oude IJssel.



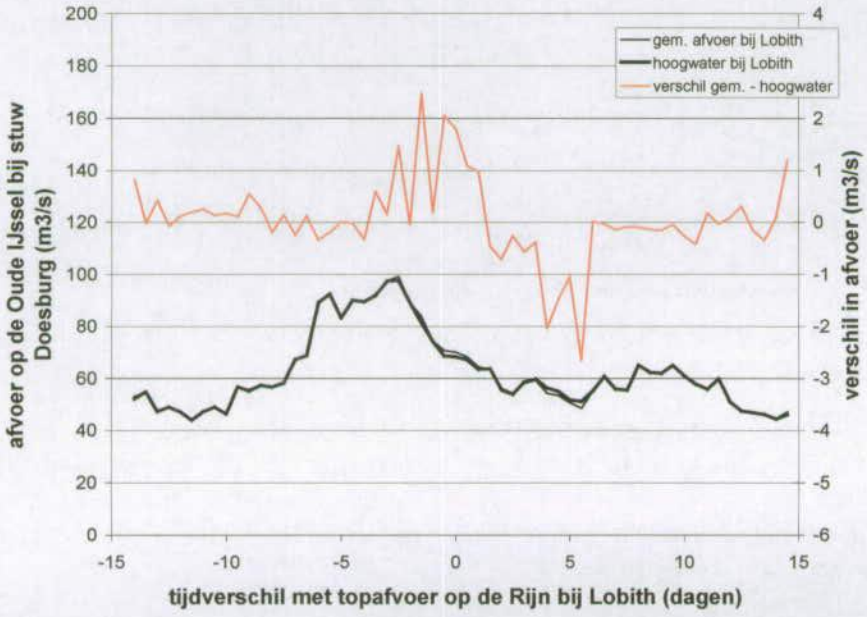
Figuur D-1: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het gemiddelde afvoerverloop van de Oude IJssel.

Als het 5% percentiel van het afvoerverloop van de Oude IJssel wordt geanalyseerd, dan blijkt dat bij lagere afvoeren op de Oude IJssel de invloed van de waterstand op de Gelderse IJssel geringer is, zie Figuur D-2. Bij lagere afvoeren worden de stuwen op de Oude IJssel niet gestreken, waardoor benedenstrooms bij Doesburg hogere waterstanden moeten optreden om de afvoer op de Oude IJssel te beïnvloeden.



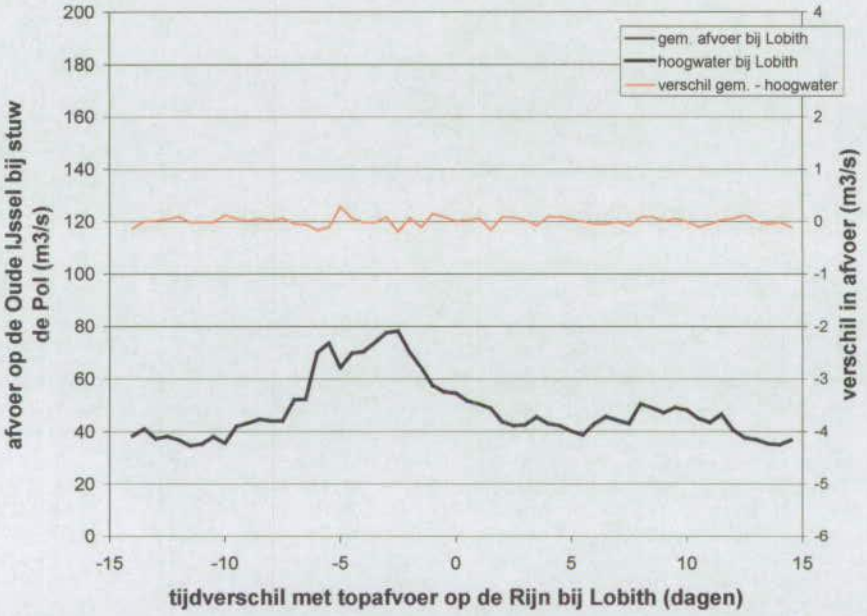
Figuur D-2: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het 5% afvoerverloop op de Oude IJssel.

Bij hogere afvoeren op de Oude IJssel is de invloed van de waterstand op de Gelderse IJssel groter. Echter deze invloed resulteert in een maximale verhoging van de topafvoer op de Oude IJssel bij Doesburg met 2 m^3/s. Deze invloed wordt verwaarloosbaar geacht.



Figuur D-3: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in Doesburg voor het 95% afvoerverloop op de Oude IJssel.

De figuur op de volgende pagina geeft het afvoerverloop op de Oude IJssel bij stuw de Pol. Uit de figuur blijkt dat de invloed van de hoge waterstanden op de Gelderse IJssel bij de Pol niet waarneembaar zijn in het afvoerverloop bij stuw de Pol.



Figuur D-4: Invloed van de afvoer van de Rijntakken op de afvoer van de Oude IJssel in De Pol voor het 95% afvoerverloop op de Oude IJssel.

Bijlage E: Gemiddeld afvoerverloop Oude IJssel

tijdverschil met topafvoer bij Lobith (dagen)	gemiddelde (m3/s)	5% percentiel (m3/s)	30% percentiel (m3/s)	70% percentiel (m3/s)	95% percentiel (m3/s)
-13.50	25.79	4.27	13.05	32.35	52.23
-13.00	23.97	2.75	13.25	30.12	54.92
-12.50	21.58	1.85	12.06	28.13	47.36
-12.00	22.05	1.57	12.67	28.29	49.06
-11.50	21.38	2.16	12.73	25.51	47.19
-11.00	21.22	1.49	12.56	24.51	44.03
-10.50	21.12	3.19	12.51	25.47	47.16
-10.00	21.47	2.92	12.51	25.72	49.06
-9.50	23.59	3.49	12.70	30.21	46.36
-9.00	24.66	3.37	12.85	31.81	56.83
-8.50	25.49	3.36	14.91	33.75	55.25
-8.00	26.26	3.00	14.82	34.87	57.38
-7.50	27.77	4.96	16.67	35.59	56.73
-7.00	28.82	4.91	16.61	36.85	58.20
-6.50	31.65	5.58	19.27	40.45	67.29
-6.00	32.96	5.56	18.24	43.41	68.79
-5.50	33.53	4.08	21.41	40.88	89.16
-5.00	34.93	4.46	21.53	40.34	92.41
-4.50	39.10	5.86	21.70	49.53	83.34
-4.00	41.66	5.45	22.84	54.31	89.96
-3.50	45.09	8.71	24.81	59.71	89.53
-3.00	46.65	8.43	25.21	61.90	91.82
-2.50	44.16	6.60	23.71	54.83	97.36
-2.00	43.35	6.33	25.65	50.32	97.65
-1.50	40.64	5.57	25.01	50.50	89.12
-1.00	38.62	5.36	23.36	48.53	81.54
-0.50	35.39	4.68	22.97	44.44	74.27
0.00	33.65	4.41	24.13	41.83	68.67
0.50	32.37	4.30	22.86	39.47	68.29
1.00	31.28	4.10	21.48	38.61	67.18
1.50	29.68	4.71	19.85	36.06	63.47
2.00	28.72	4.01	19.11	35.02	63.70
2.50	28.07	4.51	19.91	34.04	55.96
3.00	27.49	4.35	18.93	34.27	53.95
3.50	27.54	5.07	19.03	34.79	58.67
4.00	27.06	4.33	18.48	34.47	59.73
4.50	26.78	4.03	18.45	32.68	56.42
5.00	26.24	4.19	17.35	31.97	55.02
5.50	25.94	3.60	17.39	31.30	51.80
6.00	26.54	3.95	18.28	30.39	51.28
6.50	26.15	4.37	16.70	30.20	55.27
7.00	26.04	4.20	15.90	29.40	60.76
7.50	24.97	3.86	15.23	28.60	55.95

tijdverschil met topafvoer bij Lobith (dagen)	gemiddelde (m3/s)	5% percentiel (m3/s)	30% percentiel (m3/s)	70% percentiel (m3/s)	95% percentiel (m3/s)
8.00	24.20	3.81	14.66	27.96	55.53
8.50	24.19	4.19	14.94	27.52	65.13
9.00	24.11	4.23	13.85	26.81	62.22
9.50	24.60	3.69	14.66	27.16	61.97
10.00	24.62	3.82	14.75	27.00	64.93
10.50	23.33	3.49	13.24	26.56	60.90
11.00	22.71	3.50	12.77	26.67	57.90
11.50	22.01	3.39	12.41	23.54	55.93
12.00	21.58	3.11	11.97	24.63	59.92
12.50	21.33	2.69	11.89	25.50	51.11
13.00	20.85	2.31	11.90	24.49	47.46
13.50	19.85	2.55	11.47	23.73	46.83
14.00	19.54	3.12	11.06	23.45	46.22
14.50	20.46	3.07	12.15	22.78	44.37
15.00	20.44	3.04	11.44	22.39	46.01
maximum	46.65	8.71	25.65	61.90	97.65

Tabel E-1: Randvoorwaarde Oude IJssel voor RVW2006.

HKV LIJN IN WATER
Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Telefoon: 0320 294242
Telefax: 0320 253901
e-mail: info@hkv.nl

Bezoekadres:
Botter 11 nr. 29
Lelystad