

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn

Rapport

Juni, 2006

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn

Ir. H.J.M. Ogink

rapport

Juni, 2006

Contents

1	Inleiding	1–1
2	Achtergrond	2–1
2.1	Achtergrond	2–1
2.2	Doelstelling	2–2
3	Review rapporten afvoerverdeling	3–1
3.1	Inleiding	3–1
3.2	“Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken”	3–1
3.3	“Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater”	3–8
3.4	“Nauwkeurigheid toetspeilen”	3–14
4	Analyse met aanvullende gegevens	4–1
4.1	Inleiding	4–1
4.2	Wind	4–2
4.3	Golfvorm en morfodynamiek	4–6
4.4	Falen van kades en overlaten	4–13
4.5	Verandering bodemgeometrie	4–15
4.6	Hydraulische ruwheid van het zomerbed	4–15
4.7	Hydraulische ruwheid van de uiterwaard	4–17
4.8	Modelonzekerheden	4–18
5	Onzekerheid in de afvoerverdeling	5–1
5.1	Pannerdensche Kop	5–1
5.2	IJsselkop	5–2

6	Conclusies en aanbevelingen	6–1
6.1	Conclusies	6–1
6.2	Aanbevelingen	6–2
7	Literatuur	7–1

Bijlage:

A Variantie van afvoerfractie en onzekerheid in afvoerverdeling

I Inleiding

Dit document betreft het rapport van het project: “Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn” conform de opdracht van 1 mei 2006, per brief van RWS/RIZA met kenmerk bestelnummer 4500040642.

Het onderzoek geeft een review van recente relevante studies en aanvullende analyses om inzicht te geven in de grootte van de onzekerheid in de voorspelling van de afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop. De grootte van de onzekerheid is mede bepalend voor de keuze van de maatregelen om de afvoerverdeling op de splitsingspunten op de gewenste verdeling te brengen.

De opzet van dit rapport is als volgt. De achtergrond voor deze studie en de doelstelling worden gepresenteerd in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt een drietal rapporten, waarin het effect van diverse bronnen op de onzekerheid in de afvoerverdeling wordt behandeld, gereviewd. De resultaten van die studies worden nader geanalyseerd in hoofdstuk 4 op basis van aanvullende gegevens en resultaten van berekeningen, die zijn uitgevoerd in het kader van de bepaling van de MHW-standen HR2006. Beste schattingen van de onzekerheid in de afvoerverdeling bij Pannerdensch Kop en IJsselkop worden gepresenteerd in hoofdstuk 5 en tenslotte de conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek in hoofdstuk 6.

De onzekerheid in de afvoerverdeling op de splitsingspunten bij MHW wordt in dit rapport uitgedrukt als de standaardafwijking (σ) van de variatie van de afvoerverdeling. Dit betekent dat, onder de aanname van een normale verdeling, een 90% betrouwbaarheidsinterval 3.3σ bedraagt.

2 Achtergrond

2.1 Achtergrond

De inrichting van en de waterkeringen in het Rijntakken systeem zijn gebaseerd op de gewenste (beleidsmatige) afvoerverdeling. Zoals in de opdrachtomschrijving wordt gesteld wijkt de afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdensche Kop en IJsselkop op dit moment af van de gewenste afvoerverdeling. Om de veiligheid tegen overstroming langs de takken op het gewenste niveau te houden heeft Rijkswaterstaat Dienst Oost Nederland het plan om de afvoerverdeling aan te passen. De keuze in maatregelen om deze aanpassing te plegen is onder andere afhankelijk van de onzekerheid die mag worden verwacht in de afvoerverdeling; bij een grote onzekerheid zou een regelbare oplossing zinvol kunnen zijn, terwijl bij een kleine onzekerheid mogelijk andere oplossingen meer voor de hand liggen.

De maatgevende waterstand op een plaats langs de Rijntakken wordt bepaald door het debiet ter plaatse en de afvoer- en retentiecapaciteit van de rivier benedenstrooms met de zijdelingse toestroming. Het debiet ter plaatse is een functie van de grootte en vorm van de ontwerpafvoer bij Lobith en de verdeling van de afvoer over de splitsingspunten. Onzekerheden in de maatgevende waterstanden worden dus o.m. bepaald door de onzekerheid in de afvoerverdeling.

De afvoerverdeling op de splitsingspunten bij maatgevend hoogwater wordt bepaald door de verhouding van de afvoercapaciteit van de benedenstroomse takken en de vorm van het splitsingspunt. De capaciteit van de takken is een functie van de geometrie van de rivier, de hydraulische ruwheid van zomerbed, kribvak en uiterwaard, wind, de effectieve viscositeit, de waterdiepte en het verhang. De onzekerheid in de afvoerverdeling bij maatgevend hoogwater wordt bepaald door de grootte van de natuurlijke variabiliteit van het riviersysteem en onzekerheden die geïntroduceerd worden door de toepassing van hydraulische modellen die het traject van gemeten naar maatgevend hoogwater beschrijven.

Recente rapporten over de afvoerverdeling bij maatgevende omstandigheden duiden op een relatief grote onzekerheid in de verdeling over de takken. Deze conclusie lijkt echter in tegenspraak met een historische analyse van waterstanden in de MSW stations uitgevoerd door van Velzen en van Vuuren van RWS RIZA, die juist een zeer geringe variatie in de afvoerverdeling bij gegeven aanvoer laat zien. Het is daarom gewenst om de rapporten nog eens aan een review te onderwerpen en na te gaan of nieuwe informatie van de historische waterstandanalyses en analyses die zijn gemaakt voor de afleiding van de nieuwe randvoorwaarden HR 2006 (van Velzen 2006), aanleiding geven de conclusies aan te scherpen.

2.2 Doelstelling

De doelstelling van het project is het inzichtelijk maken van de grootte van de onzekerheid in de voorspelling van de afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdensche Kop en IJsselkop bij maatgevende omstandigheden door middel van een review van rapporten over dit onderwerp en van analyses van historische waterstanden en analyses die in het kader van de HR 2006 berekeningen zijn uitgevoerd. Volgens de opdracht dient de onzekerheid van de afvoerverdeling (σ) bij Pannerdensche Kop te worden geschat in termen van:

1. Onzekerheid afvoerverdeling relatief klein: orde 100 - 200 m³/s
2. Onzekerheid afvoerverdeling groot: orde 1000 m³/s
3. Onzekerheid afvoerverdeling middelgroot: orde 500 m³/s.

Indien voor IJsselkop eenzelfde maat in verhouding tot de bovenaanvoer wordt toegepast dan is de onzekerheid hier te schatten in termen van:

1. Onzekerheid afvoerverdeling relatief klein: orde 50 - 100 m³/s
2. Onzekerheid afvoerverdeling groot: orde 400 m³/s
3. Onzekerheid afvoerverdeling middelgroot: orde 200 m³/s.

3 Review rapporten afvoerverdeling

3.1 Inleiding

In het verleden zijn verschillende studies uitgevoerd naar de onzekerheid in de afvoerverdeling. De review omvat de volgende rapporten:

1. HKV: “Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken”, april 1999, rapport PR 163
2. Schropp: “Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater”, RIZA rapport 2002.047
3. Ogink: “Nauwkeurigheid toetspeilen”, november 2003, werkdocument

Alleen die onderdelen van bovengenoemde studies worden besproken die relevant zijn voor de beoordeling van onzekerheid in de afvoerverdeling bij de huidige inrichting van de rivier.

3.2 “Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken”

Het rapport PR 163 van HKV (M.T. Duits en J.M. van Noortwijk, 1999) betreft een nauwkeurighedsanalyse van rivierverruimende maatregelen die in de studie “Ruimte voor Rijntakken” zijn onderzocht. In deze analyse zijn onzekerheden in bodemligging, hydraulische ruwheid en randvoorwaarden van het Sobek-model voor de Rijntakken en het WAQUA-model van de IJsseldelta met behulp van Monte Carlo-simulaties vertaald naar 90% betrouwbaarheidsbanden van de MHW-standen. Voor deze evaluatie zijn de Monte Carlo-simulaties met het Sobekmodel zonder de inrichtingsalternatieven van belang, omdat hiermee de onzekerheid in genoemde grootheden op de afvoerverdeling op de splitsingspunten in kaart kan worden gebracht. Belangrijk hierbij is na te gaan hoe groot de onzekerheden worden ingeschat en hoe deze in de Monte Carlo-simulaties worden gemodelleerd.

Onderscheid wordt gemaakt naar drie typen onzekerheid:

1. Natuuronzekerheid, in de ruimte en in de tijd, waarbij alleen de ruimtelijke variabiliteit van de hydraulische ruwheid, de geometrie en het verhang wordt meegenomen. Er is uitgegaan van een in de tijd onveranderlijke bodemligging; morfologische effecten zijn dus niet in beschouwing genomen.
2. Statistische onzekerheid, die buiten beschouwing wordt gelaten. De onzekerheid in de maatgevende afvoer wordt niet meegenomen.
3. Modelonzekerheid en rekenonnauwkeurigheid. Modelonzekerheden die beschouwd worden zijn afvoerverdeling op de splitsingspunten en de benedenstroomse randvoorwaarden.

Twee HKV-experts zijn geconsulteerd om een inschatting te maken van de belangrijkste onzekerheden in de vorm van het 5%-, 50%- en 95%-percentiel en de grootte van de ruimtelijke correlaties. Voorts zijn resultaten van literatuuronderzoek in beschouwing genomen.

In de Monte Carlo-simulaties is gebruik gemaakt van de simple-random-sampling techniek, waarbij de parameters rechtstreeks worden getrokken uit vooraf gespecificeerde kansverdelingen. Zowel de normale als de lognormale verdeling is toegepast. Trajecten met een lengte van ongeveer 500 m zijn beschouwd, elk met een constante maar onzekere ruwheidswaarde en geometrie. Ook worden de benedenstroomse randvoorwaarden als stochastische variabelen meegenomen.

Bodemruwheid

Onderscheid wordt gemaakt tussen:

1. ruwheid zomerbed
2. ruwheid kribvak, en
3. ruwheid uiterwaard.

In de studie is de ruwheid van het zomerbed, het kribvak en van de uiterwaard op de Bovenrijn en de Waal elk afzonderlijk met 5 Chezy-punten verhoogd. Aangetoond wordt dat de ruwheid van het zomerbed het grootste effect heeft op de waterstanden (5/9), gevolgd door de ruwheid van de uiterwaard (3/9); de ruwheid van het kribvak is het minst van invloed (1/9). Omdat deze laatste waarschijnlijk ook weinig onzekerheid bevat is deze parameter niet als een stochastische variabele beschouwd in dit onderzoek.

Ruwheid zomerbed

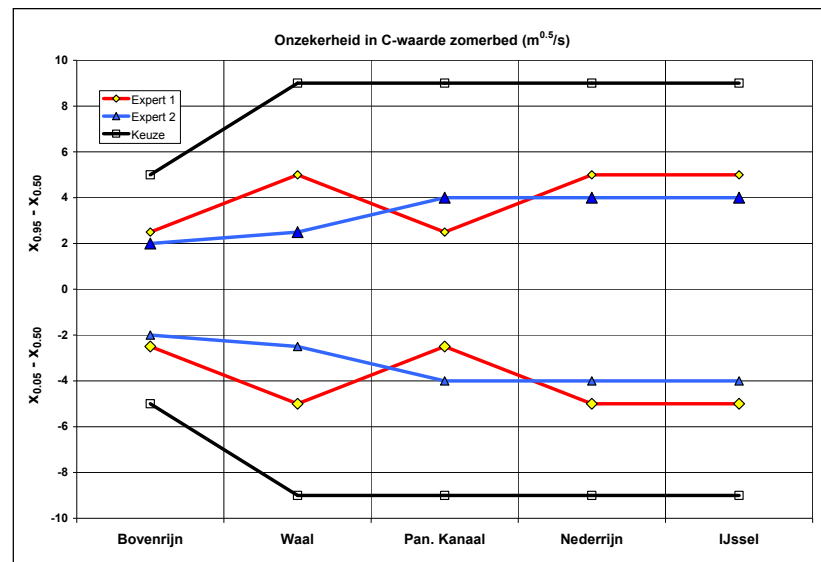
De ruwheid van het zomerbed wordt in Sobek weergegeven door een Chezy-waarde ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$) die door ijking, bij aangenomen ruwheid van uiterwaard en kribvak en gegeven geometrie wordt vastgesteld. De onzekerheid in de ruwheidsparameters is aangegeven als een 90% betrouwbaarheidsinterval in Figuur 3-1 en Tabel 3-1. De schatting van twee HKV-experts is gepresenteerd als een symmetrisch interval. In de studie is ook voor een symmetrische variatie gekozen, die echter een factor twee groter is dan de geconsulteerde experts hebben aangegeven. Als verklaring wordt gegeven dat de ruimere intervallen beter aansluiten bij de waarden in de internationale literatuur en voorts om het 90% nauwkeurighedsinterval van de afvoer door de IJssel in Sobek gelijk te maken aan die in WAQUA. WAQUA is in die studie als detailmodel voor de beneden-IJssel ingezet.

Tabel 3-1 90% onzekerheidsinterval, standaarddeviatie en correlatie in zomerbedruwheid (C-waarde $\text{m}^{0.5}/\text{s}$) volgens HKV-experts en gekozen interval

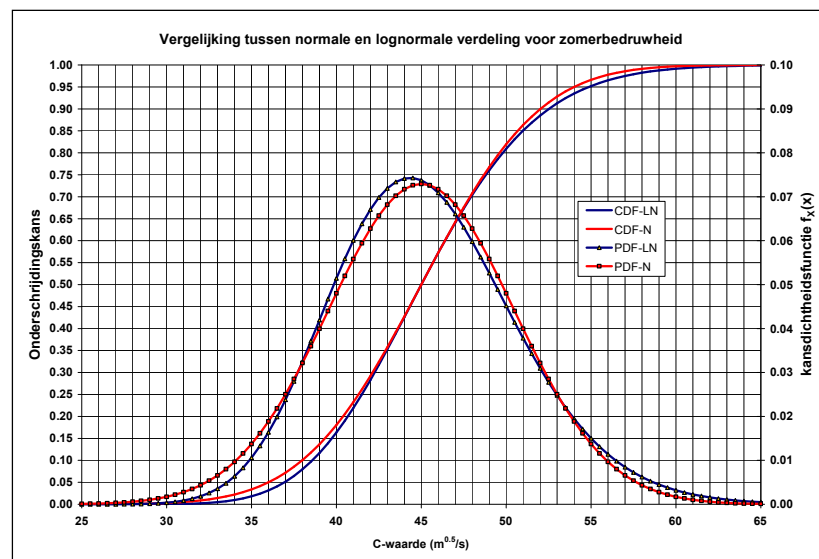
Rivier	Experts			Keuze		
	90% int. ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$)	σ_N ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$)	ρ	90% int. ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$)	σ_N ($\text{m}^{0.5}/\text{s}$)	ρ
Bovenrijn	$\pm 2.0\text{-}2.5$	1.2-1.5	0.25-0.75	± 5	3.0	0.5
Waal	$\pm 2.5\text{-}5.0$	1.5-3.0	0.25-0.75	± 9	5.5	0.5
Pan. Kanaal	$\pm 2.5\text{-}4.0$	1.5-2.4	0.25-0.75	± 9	5.5	0.5
Nederrijn	$\pm 4.0\text{-}5.0$	2.4-3.0	0.25-0.75	± 9	5.5	0.5
IJssel	$\pm 4.0\text{-}5.0$	2.4-3.0	0.25-0.75	± 9	5.5	0.5

Merkwaardig is dat ondanks de symmetrische onzekerheidsbanden rond de mediaan, uiteindelijk de variatie in de zomerbedruwheid in de Monte Carlo-simulaties toch is beschreven met een lognormale verdeling met een drempelwaarde van $1 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Figuur 3-2 toont aan deze omzetting weinig effect heeft op de frequentieverdeling. De noodzaak is echter niet duidelijk; negatieve C-waarden kan men vermijden door deze te vervangen door de fysische ondergrens.

T.a.v. de correlatie is het gemiddelde aangenomen van de schatting van de experts.



Figuur 3-1 90% onzekerheidsband in zomerbedruwheid (C-waarde $\text{m}^{0.5}/\text{s}$) volgens HKV-experts en gekozen interval



Figuur 3-2 Vergelijking tussen de normale verdeling voor de onzekerheid in de ruwheid en de lognormale verdeling zoals gebruikt in de Monte Carlo-simulaties bij een mediane ruwheid van $45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$.

Ruwheid van de uiterwaard

De ruwheid van de uiterwaard wordt uitgedrukt in een Nikuradse k -waarde. De onzekerheid in de ruwheid wordt beschreven met een lognormale verdeling voor de vermenigvuldigingsfactor van de mediane ruwheid. De parameters van deze verdeling worden afgeleid van een normale verdeling op basis van de schattingen van de eerder genoemde experts. Deze experts gingen uit van een 90% onzekerheidsinterval van ± 0.4 rondom de mediaan. De passende normale verdeling $N(\mu_N, \sigma_N)$ luidt dan $N(1.0; 0.243)$. Het 90% onzekerheidsinterval voor de ruwheid uitgedrukt in een C -waarde varieert van -2.6 tot $+4.0 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Om rekening te houden met onzekerheid in de ecotopenverdeling is deze verdeling aangepast tot $N(1.0; 0.321)$, d.w.z. een grotere spreiding is toegepast; in de C -waarde betekent dit een 90% onzekerheidsinterval van -4.8 tot $+5.9 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Voor de ruimtelijke correlatie is 0.5 aangenomen tussen opeenvolgende vakken.

Hoogte zomerbed en uiterwaard

De onzekerheid in de hoogte van het zomerbed en de uiterwaard is in de Monte Carlo-simulaties gemodelleerd met een normale verdeling, beiden gebaseerd op een 90% onzekerheidsinterval van $\pm 0.1 \text{ m}$. De verdelingen hebben daarmee de volgende parameters: $N(0; 0.061)$. De ruimtelijke correlatie in de zomerbedhoogte is geschat op 0.25 , terwijl voor de uiterwaard een correlatie van 0.5 wordt aangehouden. De waarden voor de uiterwaard zijn gebaseerd op de schattingen van één van de twee geconsulteerde experts in combinatie met de literatuur, waarbij de aanwezigheid van wel of geen bos niet is beschouwd. Voor het zomerbed waren de waarden voor het onzekerheidsinterval van beide geënquêteerde experts gelijkloidend; voor de ruimtelijke correlatie varieerden de schattingen van 0 - 0.25 .

Randvoorwaarden

De waterstandsrandvoorwaarden bij de Sobek-berekeningen zijn gelegd bij Vuren op de Waal, Hagestein op de Lek en het Ketelmeer bij de monding van de IJssel. Deze randen liggen echter te ver benedenstrooms van de splitsingspunten om nog invloed te kunnen uitoefenen op de afvoerverdeling. De onzekerheden in de benedenstroomse randvoorwaarden beïnvloeden natuurlijk wel de onzekerheid in de MHW-standen op de stations die in de stuwkromme van de randvoorwaarden liggen. Voor alle benedenranden is de normale verdeling toegepast in de simulaties met standaardafwijkingen van respectievelijk 0.091 , 0.106 en 0.122 m , gebaseerd op de schattingen van één van de twee geconsulteerde experts.

Resultaten

De resultaten van de analyses, voor zover relevant voor de afvoerverdeling en de consequenties voor de waterstanden onder de huidige condities, zijn samengevat in Tabel 3-2 en Tabel 3-3. De variatie in de MHW-standen blijkt symmetrisch te zijn en is daarom weergegeven als een standaarddeviatie. Deze neemt sterk af bij verlaging van de onzekerheid in de zomerbedruwheid. Hieraan ligt mede een verminderde onzekerheid in de afvoerverdeling op de splitsingspunten ten grondslag, zoals in Tabel 3-3 is getoond.

Uit Tabel 3-3 blijkt dat de onzekerheid in de afvoerverdeling bijna symmetrisch t.o.v. de gemiddelde afvoer naar een tak. De onzekerheid neemt af bij afnemende zomerbedruwheid.

De tabel toont aan dat de onzekerheid in de afvoer naar de Waal en Pannerdensch Kanaal ongeveer gelijk is aan die naar de IJssel; die in de afvoer naar de Nederrijn/Lek Kop is orde 12% kleiner dan voor de IJssel.

In kolom 5 van Tabel 3-3 is de onzekerheid in de afvoerverdeling aangegeven indien de ruwheid in het zomerbed geen stochastische variabele is. De waarden zijn verkregen door lineaire extrapolatie naar $\Delta C_{90\%} = 0$. De onzekerheid in de afvoerverdeling die overblijft wordt dan uitsluitend veroorzaakt door de onzekerheid in de uiterwaardruwheid en in de bodemligging (benedenstroomse randvoorwaarden hebben een verwaarloosbare invloed op de afvoerverdeling). Het effect van de laatste onzekerheden hebben volgens deze benadering een veel geringer effect op de afvoerverdeling dan die in de zomerbedruwheid. Opvallend is dan dat de onzekerheid in de afvoerverdeling op de IJssel en de Nederrijn ongeveer even groot is en beiden aanmerkelijk kleiner zijn dan die voor de Waal en het Pannerdensch Kanaal.

Tabel 3-2 Standaard deviatie in MHW standen t.g.v. onzekerheid in ruwheid, geometrie en benedenstroomse randvoorwaarden voor 90% onzekerheidsintervallen in de zomerbedruwheid van resp. 18, 14 en 10 m^{0.5}/s

Locatie	$\sigma(\text{MHW})$ $\Delta C_{90\%}=18 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$	$\sigma(\text{MHW})$ $\Delta C_{90\%}=14 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$	$\sigma(\text{MHW})$ $\Delta C_{90\%}=10 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$
Lobith	0.061	0.055	0.049
Pannerdense Kop	0.058	0.049	0.036
Nijmegen	0.083	0.067	0.049
Tiel	0.087	0.073	0.055
St. Andries	0.097	0.079	0.061
Zaltbommel	0.098	0.079	0.061
Vuren	0.093	0.091	0.091
IJsselpop	0.084	0.067	0.049
Driel, boven	0.096	0.079	0.061
Driel, beneden	0.097	0.079	0.061
Grebbe	0.117	0.091	0.073
Amerongen, boven	0.082	0.067	0.055
Amerongen, beneden	0.082	0.067	0.055
Culemborg	0.085	0.085	0.079
Hagestein, boven	0.100	0.097	0.097
Hagestein, beneden	0.104	0.103	0.103
Doesburg	0.114	0.091	0.067
Zutphen	0.112	0.091	0.067
Deventer	0.124	0.097	0.073
Olst	0.115	0.091	0.067
Wijhe	0.113	0.091	0.067
Katerveer	0.114	0.091	0.067
Kampen	0.123	0.097	0.079
Ketelmeer	0.123	0.122	0.122

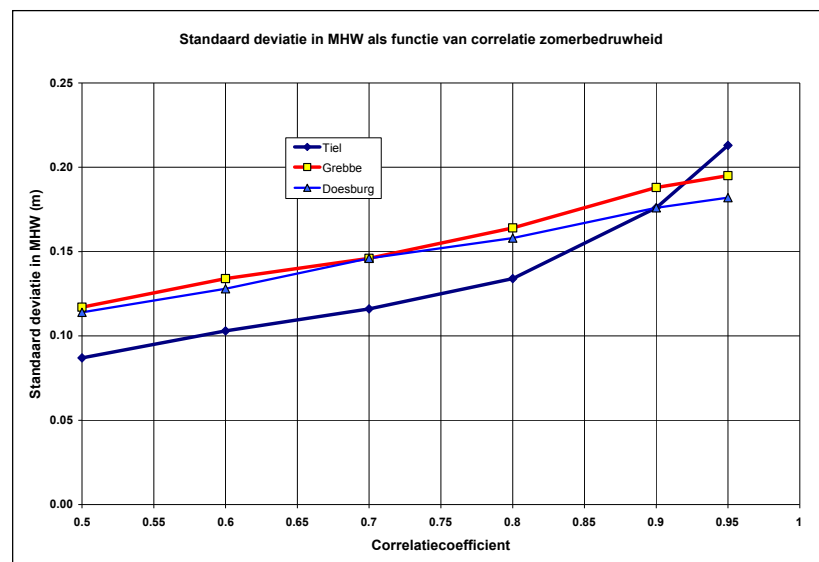
Tabel 3-3 90% onzekerheidsinterval in afvoer naar Rijntakken t.g.v. onzekerheid in ruwheid, geometrie en benedenstroomse randvoorwaarden voor 90% onzekerheidsintervallen in de zomerbedruwheid van resp. 18, 14 en $10 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ (kolommen 5 en 6 toegevoegd in deze studie)

Riviertak	$90\% \Delta Q_{\text{tak}}$ $\Delta C_{90\%}=18$ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$	$90\% \Delta Q_{\text{tak}}$ $\Delta C_{90\%}=14$ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$	$90\% \Delta Q_{\text{tak}}$ $\Delta C_{90\%}=10$ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$	$90\% \Delta Q_{\text{tak}}$ $\Delta C_{90\%}=0$ $\text{m}^{0.5}/\text{s}$	Effect zomerbedruwheid op afvoerverdeling
1	2	3	4	5	6
Waal	-172 tot 174	-140 tot 141	-107 tot 108	-26 tot 26	-81 tot 82
Nederrijn	-151 tot 155	-121 tot 124	-91 tot 93	-16 tot 16	-75 tot 77
IJssel	-170 tot 178	-136 tot 141	-102 tot 105	-15 tot 15	-87 tot 90

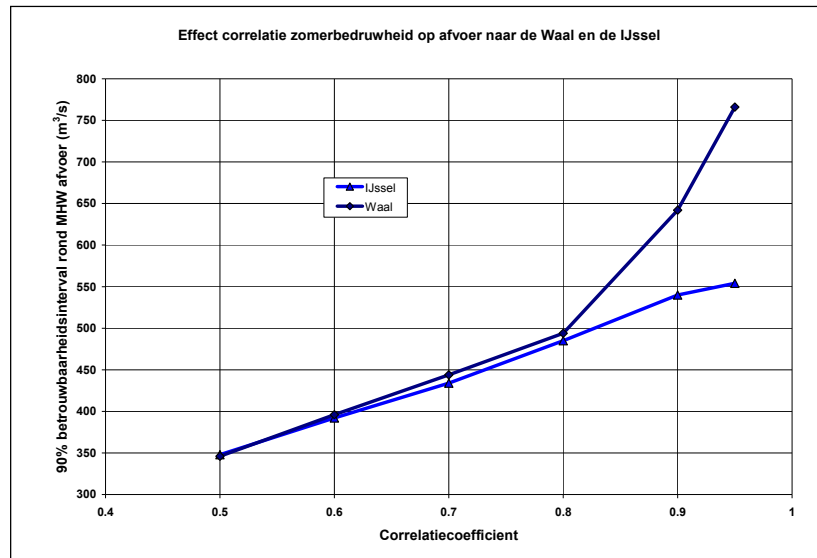
Kolom 6 van Tabel 3-3 geeft het verschil tussen kolom 4 en 5 en kan worden opgevat als de 90% betrouwbaarheidsband voor de afvoerverdeling t.g.v. een variatie in de zomerbedruwheid van $10 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ (de expertschatting), vooropgesteld dat de eerder genoemde lineaire extrapolatie acceptabel is. Deze procedure wordt niet in het rapport gegeven, maar is door Schropp (2002) toegepast om het effect van onzekerheid in de zomerbedruwheid op de afvoerverdeling te bepalen, zoals in sectie 3.3 wordt besproken.

Effect correlatie zomerbedruwheid in lengterichting

Het onderzoek heeft ook aangetoond dat de grootte van de ruimtelijke correlatie tussen de vakken per tak in de zomerbedruwheid sterk van invloed is op de onzekerheid in de MHW-standen en dus ook op de afvoerverdeling van invloed is. Dit is geïllustreerd in Figuur 3-3 en Figuur 3-4.



Figuur 3-3 Effect van ruimtelijke correlatie in de zomerbedruwheid op de standaard deviatie van de MHW-standen te Tiel (Waal), Grebbe (Nederrijn) en Doesburg (IJssel)



Figuur 3-4 Effect van ruimtelijke correlatie in de zomerbedruwheid op het 90% betrouwbaarheidsinterval rond de gemiddelde MHW afvoer naar de Waal en de IJssel

Met betrekking tot de waterstanden neemt met name de onzekerheid in de MHW-standen op de Waal sterk toe bij maximale correlatie. Voor het effect van de correlatie op de afvoerdeling op de splitsingspunten is in de studie alleen de onzekerheid op de IJsselafoer gegeven, zie Figuur 3-4. Hier is de Waal aan toegevoegd op basis van het effect van de correlatie op de onzekerheid in de waterstand bij Nijmegen. De figuur geeft aan dat de correlatie een gelijk effect heeft op de Waal en de IJssel behalve wanneer de correlatie heel hoog wordt; in dat geval neemt vooral de onzekerheid in de Waalafvoer bij MHW afvoer sterk toe. Voor de IJssel blijkt ook dat de gemiddelde MHW-afvoer naar de tak iets toeneemt bij oplopende correlatie (0.5% bij een toename van de correlatie van 0.5 naar 0.95). Kennis over de grootte van deze correlatie is dus belangrijk.

Het effect van de toenemende onzekerheid in de afvoer op de splitsingspunten bij toenemende correlatie tussen de vakken per tak is te verklaren uit de sterke verandering van de ruwheid in een tak in dezelfde richting **onafhankelijk** van de ruwheidsontwikkeling op een andere tak. Indien de correlatie ook zou worden toegepast op aangrenzende takken dan wordt het effect van correlatie in de ruwheid in lengterichting weer geneutraliseerd.

Effect ruimtelijke correlatie uiterwaardruwheid

Eenzelfde analyse als voor de zomerbedruwheid is ook uitgevoerd voor de uiterwaardruwheid. Dit effect blijkt veel kleiner te zijn. Een correlatie van 0.95 in lengterichting in de uiterwaardruwheid heeft ongeveer eenzelfde effect als een correlatie in de ruwheid van het zomerbed van 0.6.

3.3 “Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater”

Het rapport 2002.047 van RIZA (M.H.I. Schropp, 2002) beschrijft de uitkomsten van onderzoek dat in opdracht van RWS/Directie Oost-Nederland is uitgevoerd naar de onzekerheidsbronnen in de afvoerverdeling bij MHW. Het doel was om de marges vast te stellen waarbinnen de werkelijke afvoerverdeling tijdens MHW door verschillende factoren kan afwijken van de berekende waarde en het relatieve belang van de factoren. Anders dan het vorige onderzoek betreft het hier een **gevoeligheidsanalyse** en geen nauwkeurighedsanalyse; er worden geen statistische uitspraken gedaan.

Het effect van de volgende factoren, die relevant zijn voor deze studie, is onderzocht:

1. Windkracht en windrichting tijdens MHW;
2. De opstuwing door zijdelingse toestroming tijdens MHW;
3. De vorm van de MHW-golf;
4. Morfologische ontwikkelingen tijdens MHW;
5. Het falen van kades en overlaten tijdens MHW;
6. Veranderingen in de riviergeometrie gedurende de 5-jaarlijkse periode tussen de vaststelling van de MHW-standen;
7. Formulering van de hydraulische ruwheid en de extrapolatie daarvan naar MHW-omstandigheden, en
8. Gebruikte modelparameters.

Waar mogelijk is gebruik gemaakt van dynamische berekeningen met WAQUA-Rijntakken-model (WAQUA-versie 2002.02 met verbeterde overlaatroutine, Rijntakkenmodel MHW98_2). Effecten van wind, golfvorm en morfodynamiek zijn berekend met het Sobek Rijntakkenmodel.

Evenals in de voorgaande studie is ook hier niet de onzekerheid in de grootte van MHW-topafvoer van 16.000 bij Lobith meegenomen.

Windinvloed

Volgens de Leidraad zijn de kans op wind en de kans op een piekafvoer statistisch onafhankelijk. In de MHW-berekeningen wordt wind niet in beschouwing genomen. In de Leidraad zijn windsnelheden als functie van de wind-richting gegeven, die variëren van 12 m/s (= krachtige wind) bij richtingen tussen zuidwest en west tot 9 m/s (= vrij krachtige wind) tussen noord en zuidoost. De windrichtingen tussen zuid en west hebben de grootste kans van voorkomen in de winterperiode.

De resultaten van windinvloed op de afvoerverdeling voor de windsnelheden en windrichtingen volgens de Leidraad zijn in Tabel 3-4 samengevat. In de berekeningen is de windwrijvingscoëfficiënt gebaseerd op normale waarden voor de parameters voor meren, terwijl voor de beschuttingsfactor de default waarde 1 is aangenomen, d.w.z. geen reductie.

Tabel 3-4 Effect van wind volgens Leidraad op de afvoerverdeling

Tak	Min (m ³ /s)	V _{wind} (m/s)	Richting	Max (m ³ /s)	V _{wind} (m/s)	Richting
Waal	-41	12	ZW	20	9	O
Nederrijn/Lek	-19	12	W	10	9	ZO
IJssel	-25	9	ONO	52	12	WZW

Het effect voor Pannerdensche Kop is het grootst bij zuidwestenwind waarbij meer water richting het Pannerdensch Kanaal en vooral richting de IJssel wordt gestuwd. Maximale afwijking treedt op bij west-zuidwestenwind op de IJssel met een verhoging van 52 m³/s.

Voor hogere windsnelheden dan in de leidraad is aangenomen zijn de effecten op de afvoerverdeling volgens de studie aanzienlijk groter:

- Bij windsnelheden van 25 tot 32 m/s uit zuid tot west neemt de Waalafvoer met 200 tot 400 m³/s af. Gezien de oriëntatie van de Nederrijn zal ook hier de afvoer afnemen en zullen beide afnames een zeer forse toename veroorzaken op de IJssel.
- Bij windsnelheden van 25 tot 32 m/s uit noord tot oost neemt de Waalafvoer met 200 tot 450 m³/s toe. Ook hier kan men verwachten dat de Nederrijn ongeveer hetzelfde reageert als de Waal en zal bij een dergelijke windrichting de afvoer via de IJssel sterk afnemen.

In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op windsnelheid en richting bij hoge afvoer.

Zijdelingse toestroming

De zijdelingse toestromingen die in de MHW-berekeningen in acht worden genomen leiden tot een verstoring op de afvoerverdeling van enkele m³/s en spelen daarom voor de onzekerheid in de afvoerverdeling geen rol van betekenis.

Golfvorm

Effect van de golfvorm sec op de afvoerverdeling is onderzocht met Sobek voor een vaste bodem. Bij de MHW-berekeningen wordt uitgegaan van een mediane golf. T.o.v. deze ontwerpgolf laten Sobek berekeningen zien dat met een smallere golf iets meer water via de Waal wordt afgevoerd. Dit levert daar echter geen hogere waterstanden op door versterkte topvervlakking. Bij een smalle golf reduceert de afvoer naar het IJssel, de Nederrijn/Lek en vooral het Pannerdensch Kanaal in de orde 40 tot 70 m³/s, zie Tabel 3-5. Bij een zeer brede golf ($P > 0.8$), neemt de afvoer naar deze takken juist met enkele tientallen m³/s toe. Op alle takken (ook op de Waal waar de afvoer iets afneemt) nemen dan de MHW-standen toe sterker dan de afvoerverandering doet vermoeden door verminderde demping. De kans op dergelijke brede golven is echter zeer klein.

Tabel 3-5 Effect van golfvorm op afvoerverdeling in m³/s

Tak	P=0.025 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$	P=0.5 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$	P=0.975 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$
Waal	9	0	-5
Pan. Kanaal	-70	0	26
Nederrijn/Lek	-44	0	14
IJssel	-55	0	20

Morfodynamiek

Voor dezelfde afvoergolven met een piekwaarde van 16.000 m³/s als waarvoor het effect van de golfvorm op de afvoerverdeling is onderzocht zijn met Sobek quasi-stationaire morfologische berekeningen uitgevoerd. Het effect op de afvoerverdeling is weergegeven in Tabel 3-6. De tabel geeft aan dat er een duidelijk verband is met de duur van de golf: hoe langer de duur, hoe sterker de morfologische verandering en hoe groter het effect is op de afvoerverdeling.

Tabel 3-6 Effect morfodynamiek op afvoerverdeling in m³/s voor een smalle, mediane en brede afvoergolf met een piekwaarde van 16.000 m³/s

Tak	P=0.025	P=0.50	P=0.975
Waal	-28	-75	-168
Nederrijn/Lek	20	55	133
IJssel	8	20	35

T.a.v. Pannerdensche Kop is het effect volgens het model éénduidig: ongeacht de vorm van de golf neemt bij de passage van de golf de afvoer naar de Waal af en dus die naar het Pannerdensch Kanaal toe. Bij IJsselkop neemt de afvoer, gecorrigeerd voor de veranderde afvoer door het Pannerdensch Kanaal, naar de Nederrijn toe ten koste van de afvoer naar de IJssel. De bodem van de IJssel schuurt echter meer uit dan die van de Nederrijn, maar omdat de breedte van het zomerbed van de Nederrijn groter is dan die van de IJssel neemt de Nederrijnafvoer toch toe onder invloed van morfologische veranderingen. Berekeningen tonen voorts aan dat een verandering in de aannames over de sedimentverdeling op de splitsingspunten van 5% een marginaal effect heeft op de afvoerverdeling omdat de tijdschaal van de afvoergolf relatief klein is t.o.v. de morfologische tijdschaal.

Sinds het uitkomen van dit RIZA-rapport is het morfologisch model opnieuw geijkt, omdat de transporten en voortplantingssnelheden te groot waren.

Falen van kades en overlaten

In het rapport wordt gerefereerd aan diverse gevallen van falen van kades en overlaten in de omgeving van de splitsingspunten in de periode 1914-1970. Hoewel bij de recente hoogwaters daar geen sprake van is geweest blijft de kans aanwezig. De gevolgen van bezwijken op de afvoerverdeling zijn met WAQUA onderzocht door in elke kade een gat aan te brengen van 1 á 2 roostercellen. Steeds is uitgegaan van het falen van één kade. Het meest extreme effect per tak is weergegeven in Tabel 3-7.

Tabel 3-7 Afvoereffect van falen van kades en overlaten langs de Rijntakken

Riviertak	Kade	Waal $\Delta Q(m^3/s)$	Nederrijn $\Delta Q(m^3/s)$	IJssel $\Delta Q(m^3/s)$
Bovenrijn	Byland	-4	1	1
Waal	Millingerdam	16	-7	-7
Pannerdensch Kanaal	kade over Pannerdensche Kop	-64	27	31
Nederrijn	Praets	-1	1	0
IJssel	Koningspley	-5	-36	46

Berekende effecten zijn natuurlijk sterk afhankelijk van de aannames t.a.v. de bresbreedte. De keuze van de bresbreedte wordt in het rapport niet onderbouwd. Ook is geen rekening gehouden met ontgrondingskuilen achter een bres, die de afvoercapaciteit door de bres vergroten.

Veranderingen in de riviergeometrie

Met WAQUA is het effect onderzocht van een bodemdaling van 0.10 m in de bovenloop van elke tak afzonderlijk en van alle takken gezamenlijk. Een dergelijke bodemontwikkeling is als representatief aangenomen voor de periode tussen twee opeenvolgende MHW-berekeningen. Het resultaat is weergegeven in Tabel 3-8.

Tabel 3-8 Effect van 0.10 m daling van de hoogte van het zomerbed op de afvoerverdeling

Riviertak	Traject met bodemverandering	Waal $\Delta Q(m^3/s)$	Nederrijn $\Delta Q(m^3/s)$	IJssel $\Delta Q(m^3/s)$
Waal	PK-Nijmegen	44	-23	-22
Pan. Kanaal	PK-IJsselkop	-48	25	23
Nederrijn	IJsselkop-Driel	-13	36	-23
IJssel	IJsselkop-Dieren	-15	-30	45
Alle Rijntakken	Alle trajecten	-32	8	24

In het rapport wordt het resultaat gegeven van een berekening met de bodemligging van 1993 en 1997 waarin de Nederrijn en de IJssel met resp. 0.2 en 0.2 m zijn gestegen en die van de Waal en het Pannerdensch Kanaal met 0.1 resp. 0.15 zijn gedaald. Het resultaat laat een beperkt afvoereffect zien van tussen de 14 en 29 m³/s.

Hydraulische ruwheid

T.a.v. de zomerbedruwheid wordt in het rapport de afvoerverandering op de splitsingspunten gepresenteerd van het voor HR2001 gebruikte model waarbij de zomerbedruwheid is vervangen door die van HR1996. Tabel 3-9 laat zien dat in de bovenloop van alle takken de zomerbedruwheid die voor HR1996 is gehanteerd aanmerkelijk hoger ligt, met als uitschieter de bovenloop van de IJssel. Daardoor gaat er in HR1996 minder afvoer richting de IJssel en meer naar de Nederrijn. De tabel geeft ook aan dat een hogere ruwheid op de Waal niet hoeft te leiden tot een verminderde afvoer via die tak als ook de ruwheid op het Pannerdensch Kanaal toeneemt; in de verschilberekening gaat er zelfs meer naar de Waal

ondanks de hogere zomerbedruwheid. Slechts als de zomerbedruwheid van alleen de Waal toeneemt is dat zo, zoals in de laatste kolom is aangegeven; en verdubbeling van de k-waarde leidt dan tot 79 m³/s minder afvoer via de Waal bij MHW. De resultaten tonen aan dat bij de effectberekeningen de correlatie in de ruwheid tussen de takken onderling belangrijk is.

Uiteindelijk is door Schropp (2002) de variatie in de afvoerverdeling t.g.v onzekerheid in de zomerbedruwheid voor extrapolatie van gemeten hoogwater naar MHW geschat op basis van de resultaten van de Monte Carlo-simulaties die door Duits et al, (1999) gepresenteerd zijn, zie hiervoor Tabel 3-3, kolom 6. Gesteld wordt dat een 90% betrouwbaarheidsinterval van 18 m^{0.5}/s in de C-waarde die door Duits et al. (1999) is aangenomen te ruim is. Een interval ter grootte van 10 m^{0.5}/s wordt in het rapport als realistischer beschouwd, omdat het verschil in waterstand en hydraulische condities tussen het calibratiehoogwater en MHW niet erg groot is en dus ook de verandering in de C-waarde niet erg groot kan zijn. Schropp (2002) hanteert een 90% betrouwbaarheidsinterval in de afvoerverdeling als effect van variatie in de zomerbedruwheid van ± 75 m^{0.5}/s; een schatting die qua orde van grootte aansluit bij de waarden in Tabel 3-9.

Tabel 3-9 Effect van zomerbedruwheid op afvoerverdeling op splitsingspunten

Rivier	k- waarde (m) ^{*)} HR1996	k- waarde (m) ^{*)} HR2001	ΔQ (m ³ /s) k2001→k1996	ΔQ (m ³ /s) k _{Waal} = 0.4 m
Waal (bovenloop)	0.40	0.20	44	-79
Pannerdensch Kanaal	0.35-0.50	0.27	-44	+79
Nederrijn (bovenloop)	0.25-0.35	0.25	49	41
IJssel (bovenloop)	0.60	0.23	-86	39

^{*)} globale waarden

De effecten van onzekerheid in de ruwheid van de uiterwaard op de afvoerverdeling zijn afgeleid uit berekeningen van Oosting (2001), die heeft onderzocht wat het gevolg is van een verhoging of verlaging van de k-waarde in de uiterwaard met 50% (zowel in de takken afzonderlijk als in alle takken tegelijk) op de afvoerverdeling. Voor de Chezy-waarde betekent dit een variatie van 31 tot 40 m^{0.5}/s bij een waterdiepte van 3 m en een initiële k-waarde van 0.45 m. Het resultaat is weergegeven in Tabel 3-10.

Veranderingen in de uiterwaardruwheid op een enkele tak kunnen volgens de tabel tot afvoeraanpassingen van ruim 100 m³/s leiden bij Pannerdensche Kop en tot ruim 80 m³/s bij IJsselkop. Indien de ruwheid van de uiterwaard op alle takken tegelijk met 50% wordt verhoogd of verlaagd dan blijft de wijziging van de afvoer op de splitsingspunten beperkt tot enkele tientallen m³/s. De laatste situatie is karakteristiek voor het verschil tussen een herfsthoogwater en een winterhoogwater.

Tabel 3-10 Effect van $\pm 50\%$ verandering in k-waarde uiterwaard op verdeling van de afvoer op de splitsingspunten in m^3/s

Ruwheid aangepast op tak	Waal		Nederrijn		IJssel	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Waal	-112	139	-72	58	-67	53
Pannerdensch Kanaal	-116	71	-38	61	-34	55
Nederrijn	-25	15	-56	87	-62	41
IJssel	-11	6	-29	20	-27	39
Alle takken	-35	-12	-17	58	-23	29

Gebruikte modelparameters

Het effect van onzekerheid in de afvoercoëfficiënten van kribben en overlaten op de afvoerdeling is onderzocht door de coëfficiënten te variëren van 0.8 tot 1.2. Het effect blijft beperkt tot enkele tientallen m^3/s op de Pannerdensch Kop en nog kleiner op de IJsselkop. Indien alle overlaten meedoen bij een calibratiehoogwater worden in beginsel fouten in de afvoercoëfficiënten weggeijkt via de zomerbedruwheid.

Overzicht

De resultaten uit de studie geven het volgende overzicht van afvoereffecten, zie Tabel 3-11.

Tabel 3-11 Samenvatting afvoereffecten volgens Schropp (2002)

Onzekerheidsbron		Waal		Nederrijn		IJssel	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
wind		-41	20	-19	10	-25	52
zijdelingse toestroming		-3	3	-3	3	-5	5
golfvorm		-5	9	-44	14	-55	20
morfodynamiek		-168	-28	20	133	8	35
falen kades en overlaten		-64	16	-36	33	-7	46
veranderingen riviergeometrie		-44	44	-36	36	-45	45
ruwheid zomerbed		-75	75	-75	75	-75	75
ruwheid uiterwaard		-116	139	-72	87	-67	55
gebruikte modelparameters		-32	35	-12	10	-20	21
Totaal		-548	313	-277	401	-291	354
Onzekerheid (σ)	volledige correlatie	262		206		196	
	onafhankelijk	111		90		78	

In de studie worden vervolgens de aangegeven minimum en maximum waarden gesommeerd om een indruk te geven van een mogelijke spreiding (zie rij "Totaal"). Deze range, opgevat als een 90% betrouwbaarheidsinterval, gedeeld door 2×1.64 geeft de

standaard deviatie die geldt indien alle bronnen volledig gecorreleerd zijn. Dit volgt uit de volgende betrekkingen:

$$\text{Indien: } Z = \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{dan geldt algemeen: } \text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{Cov}(X_i, X_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}$$

$$\text{Als } X_i \text{ en } X_j \text{ volledig gecorreleerd zijn dan is } r_{ij} = 1 \text{ zodat: } \text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}$$

$$\text{Als } X_i \text{ en } X_j \text{ onafhankelijk zijn dan is } r_{ij} = 0 \text{ voor } i \neq j \text{ zodat: } \text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^n \sigma_{X_i}^2$$

Bij volledige correlatie is de onzekerheid (σ) in de afvoerverdeling dus ongeveer 260 m³/s op de Pannerdensche Kop en 200 m³/s op de IJsselkop. De onzekerheidsbanden zijn echter verschoven t.o.v. MHW met -118 m³/s op de Waal, +62 m³/s op de Nederrijn en +32 m³/s op de IJssel.

Beschouwd men echter de onzekerheidsbronnen (m.u.v. golfvorm en morfodynamiek) als statistisch onafhankelijk en de gegeven range per bron als een 90% betrouwbaarheidsband, dan is onder de aanname van een normale verdeling per bron de onzekerheid (σ) op de Pannerdensche Kop 111 m³/s en op de IJsselkop ongeveer 85 m³/s. Deze waarden worden in hoofdstuk 4 nader geanalyseerd. Belangrijk daarbij, gezien de verschillen, is te beoordelen in hoeverre onzekerheidsbronnen gecorreleerd zijn.

3.4 “Nauwkeurigheid toetspeilen”

In opdracht van RIZA is door Ogink (2003) is een notitie opgesteld waarin een analyse wordt gegeven van de methode die door RIZA is ontwikkeld om de nauwkeurigheid van de toetspeilen te schatten. Deze nauwkeurigheid wordt mede bepaald door de variatie in de afvoerverdeling op de splitsingspunten. In de notitie wordt o.a. ook aandacht besteed aan de ontwikkeling van de afvoerverdeling afgeleid uit afvoermetingen.

Schatting van de nauwkeurigheid van de toetspeilen

De nauwkeurigheid van de toetspeilen wordt geschat op basis van de volgende componenten:

1. de natuurlijke variabiliteit van het riviersysteem zoals waargenomen bij opgetreden hoogwaters
2. modelonzekerheid, bestaande uit:
 - a) onzekerheid over de representativiteit van het (de) calibratiehoogwater(s)
 - b) onzekerheid in de extrapolatie van calibratiehoogwater(s) naar maatgevend hoogwater door:
 - i) fouten in de procesbeschrijving, schematisatie en procesparameters, die door ijking terecht komen in de zomerbedruwheid, en
 - ii) veranderingen in de fysische processen van het calibratiehoogwater naar het maatgevend hoogwater, met name dat van de hydraulische ruwheid van het zomerbed.

Door RIZA (Van Vuuren, 2003 en Van Velzen, 2003) worden de volgende waarden aangehouden voor de genoemde onzekerheden (standaardafwijkingen), zie Tabel 3-12.

Tabel 3-12 Onzekerheid (σ) in de MHW-standen (in cm) door natuurlijke variabiliteit en modelonzekerheid

Bron		Waal	Pann. Kanaal	Nederrijn	IJssel
Natuurlijke variabiliteit	Hele reeks	6.4	4.8	12.0	17.0
	$Q > 8000 \text{ m}^3/\text{s}$	4.1	5.3	9.3	11.1
Model	<i>Representativiteit</i>	5	5	5	5
	<i>Schematisatie, etc</i>	5	5	5	5
	<i>Fysische processen</i>	10	-	6	5
	Totaal modelonzekerheid	12.2	-	9.3	8.7
Totale onzekerheid in MHW-standen	Minimum	12.9	12.9	13.2	14.1
	Maximum	13.8	13.8	15.2	19.1

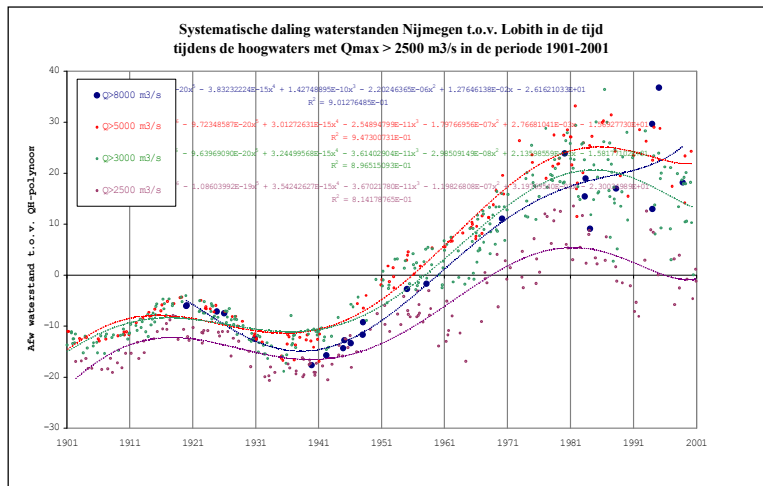
De natuurlijke variabiliteit is afgeleid uit de ruis in de relatie tussen de piekwaterstanden op de MSW-stations en de piekwaterstand bij Lobith, gecorrigeerd per afvoergroep voor bodemontwikkeling. De ruis in de piekwaterstandrelaties met Lobith zijn het grootst voor de Nederrijn en de IJssel én door de ligging achter twee splitsingspunten t.o.v. Lobith én vooral voor de IJssel door de relatief grote zijdelingse toestroming.

In de notitie wordt gesteld dat de ruis in de waterstandrelatie voor de zeer hoge afvoeren is onderschat door de gevolgde procedure. De gegevensomvang van deze afvoergroep is klein, waardoor de correctie voor bodemontwikkeling met een hogere graadspolynoom meer met curve-fitting dan met het beschrijven van de bodemontwikkeling te maken heeft. Voorts blijkt de bandbreedte van de ruis voor enkele MSW-stations de laatste decennia toe te nemen, zoals voor Nijmegen, zie

Figuur 3-5.

In de notitie is voorts als mogelijke bron voor onderschatting van de ruis in de waterstandrelaties voor alle onderscheiden afvoergroepen het gebruik van daggemiddelde waarden aangegeven. Volgens Van Vuuren (pers. comm. 2003) is echter tot 1989 steeds uitgegaan van 8-uurs-waarnemingen, zodat die bron niet van toepassing is.

Met betrekking tot onzekerheden in de representativiteit van het calibratiehoogwater is de natuurlijke variabiliteit van de Waal als uitgangspunt genomen, daar deze niet of nauwelijks beïnvloed wordt door extra ruis t.g.v. zijdelingse toestroming. De tabel geeft aan dat de aangenomen waarde ook overeenkomt met de natuurlijke variabiliteit van het Pannerdensch Kanaal.



Figuur 3-5 Waterstandsafwijkingen van polynoom als functie van de tijd voor Nijmegen per $Q_{\max}$ Lobith afvoergroep

Voor schematisatie- ruwheid- en discretisatiefouten wordt door RIZA 10% van het te overbruggen waterstandsverschil als maat genomen; de onzekerheid wordt geschat op 5 cm. In de notitie wordt erop gewezen dat dit een onderschatting is van de grootte van deze onzekerheid op basis van beoordeling van de ijking van het model op de waterstand binnen een nauw venster rond de top en geconstateerde afwijkingen daarbuiten. In de aanzet van de golf bedraagt de afwijking al snel enkele dm's in beide richtingen. Volgens RIZA (Van Velzen, pers. comm. 2006) is de afwijking in de aanzet vooral een gevolg van het vollopen van retenties, een proces dat in het traject van calibratiehoogwater naar MHW geen rol speelt. RIZA stelt daarom dat deze afwijkingen geen maat zijn voor de kwaliteit van het model. Er zijn geen plannen om van deze procedure af te wijken en te ijken over de gehele aanloop en afloop van de hoogwatergolf.

De onzekerheid in de fysische processen wordt verdisconteerd door in de hydraulische ruwheid van het zomerbed een onzekerheidsmarge van ± 5 Chezy-punten in te voeren. In deze onzekerheid zitten alle bijdragen, ook die van bijvoorbeeld de winterbedruwheid. Die onzekerheden komen via de gevolgde calibratieprocedure allemaal terecht in de zomerbedruwheid. Genoemde onzekerheden geven aanleiding tot een standaarddeviatie in de MHW-standen zoals in Tabel 3-12 is aangegeven.

In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de kwaliteit van de schattingen van deze onzekerheden. In Van Velzen (2006) wordt overigens voorgesteld om afgeronde waarden van de maximum onzekerheid uit Tabel 3-12 aan te houden voor de onzekerheid in de MHW-standen zodat een deel van bovenstaande kritiek wordt geëlimineerd.

De waarden uit Tabel 3-12 kunnen niet zondermeer vertaald worden naar de grootte van afvoervariaties over de splitsingspunten, omdat de variatie in de afvoerverdeling slechts één van meerdere bronnen is van de onzekerheid in de MHW-standen. Het geeft echter wel een indicatie voor een bovengrens. Op basis van de dh/dQ op de takken bij MHW is de onzekerheid in de MHW-stand vertaald naar een onzekerheid in de afvoerverdeling zoals aangegeven in de laatste rij van Tabel 3-13.

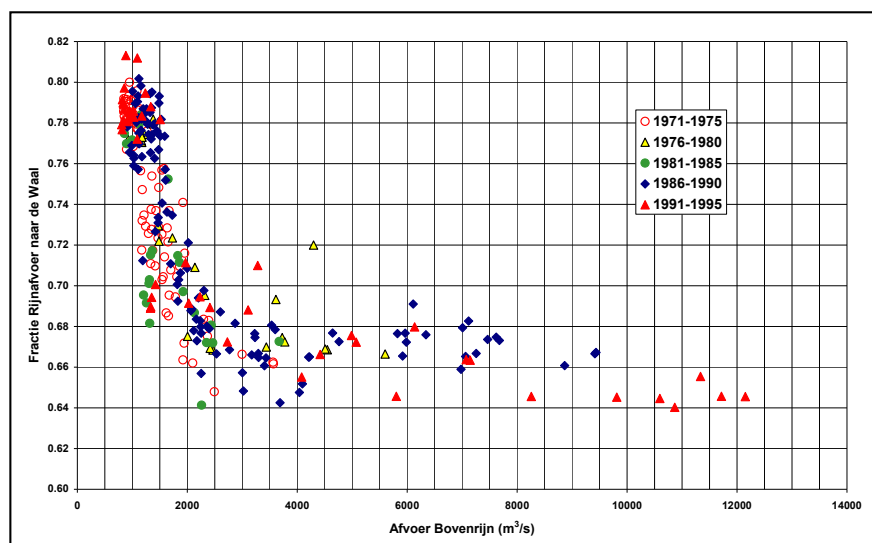
Tabel 3-13 Volledige vertaling van onzekerheid in MHW-standen naar afvoerverandering per tak

	Waal	PK	Nederrijn	IJssel
Maximum onzekerheid in MHW-standen	13.8	13.8	15.2	19.1
Δh (cm)/100 m ³ /s	4	7	8	10
onzekerheid ΔQ m ³ /s per tak	345	197	190	191

Voor Pannerdensche Kop wordt een gemiddelde waarde van 270 m³/s gevonden en voor IJsssekop 190 m³/s. Deze waarden zijn van dezelfde orde van grootte als die in Tabel 3-11 zijn vermeld in geval van volledige correlatie, maar zijn fors hoger indien de bronnen onderling niet gecorreleerd zijn.

Metingen van afvoerverdeling rond Pannerdensche Kop

Alle beschikbare afvoermetingen sinds 1971 rond Pannerdensche Kop, waarbij zowel op de Waal als op het Pannerdensch Kanaal “simultaan” is gemeten, zijn per periode van 5 jaar verwerkt in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Fractie van Rijndebiet dat via de Waal wordt afgevoerd als functie van Rijnafvoer

In de figuur is de fractie van het Rijndebiet dat via de Waal wordt afgevoerd uitgezet als functie van de Rijnafvoer. De figuur geeft aan dat de afvoer via de Waal procentueel afneemt bij grotere Rijndebieten, maar nooit de 64 % lijn gepasseerd heeft. Beleid is een afvoer via de Waal van 63.50 % bij MHW, een waarde die in lijn is met de waargenomen trend bij hoge afvoer.

In vervolg op de analyses die in de notitie zijn gegeven, zijn voor deze studie de afvoermetingen en de variatie daarin rondom Pannerdensche Kop (en ook IJsssekop, zie hierna) nader bewerkt, door de variatie in de grootte van de afvoerfractie te vertalen naar een onzekerheid in de afvoerverdeling.

Bij de hoogst gemeten debieten ($Q_{\text{Rijn}} > 8,000 \text{ m}^3/\text{s}$) was de fractie Rijnafoer via de Waal gemiddeld 0.652 met een standaardafwijking van 0.010 (2 x 10 afvoermetingen uit de periode 1986-1995). De onzekerheid in de afvoerverdeling kan worden geschat met de volgende betrekking uit de variantie van de fractie gecorrigeerd voor meetfouten in het debiet (zie Appendix A):

$$\sigma_{\Delta Q} = Q_{\text{Totaal}} \sqrt{\sigma_F^2 - 2\alpha^2(1-\alpha)^2\beta^2} \quad (3.1)$$

waarin: $\sigma_{\Delta Q}$ = onzekerheid in de afvoerverdeling (m^3/s)
 Q_{Totaal} = de afvoer bovenstrooms van de splitsing (m^3/s)
 σ_F = standaardafwijking van de fractie
 α = fractie van de bovenafvoer naar één tak
 β = relatieve fout in de afvoermeting

Zonder meetfouten is de onzekerheid in de afvoerverdeling op de Pannerdensche Kop volgens deze procedure bij $\text{MHW} \leq 160 \text{ m}^3/\text{s}$. Volgens Van Vuuren (Memo WSR 2002-027) zijn bij zeer hoge afvoeren de relatieve fouten in de afvoermetingen zeer klein $\leq 1\%$. Houdt men 1% aan dan volgt uit (3.1) voor de afvoerverdeling een onzekerheid van $150 \text{ m}^3/\text{s}$ bij MHW. Bij een relatieve meetfout van 2% (een waarde die meer in lijn is met ervaringen elders, zie Herschy, 1995) dan daalt de onzekerheid in de afvoerverdeling bij MHW naar $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze waarden bedragen respectievelijk 1.5 en 1.2 % van de MHW-afvoer naar de Waal en 2.5 en 2.0 % van de MHW-afvoer naar het Pannerdensch Kanaal. Deze getallen wijzen op een zeer stabiele afvoerverdeling over de Pannerdensche Kop. De grootte van de onzekerheid in de afvoerverdeling is aanzienlijk kleiner dan volgt uit de waterstandrelaties zoals gepresenteerd in Tabel 3-13. Dit is consistent met de redenering dat de afvoervariatie over het splitsingspunt slechts één van de oorzaken is van de ruis in de waterstandrelaties.

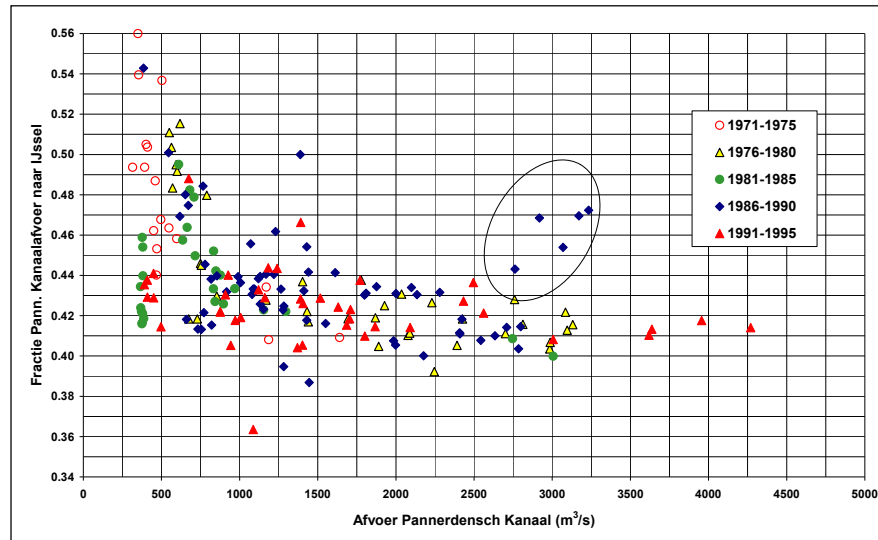
Op basis van het voorgaande wordt de natuurlijke variatie in de verdeling van de afvoer op de Pannerdensche Kop bij MHW geschat op $120\text{-}150 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is een extrapolatie op basis van metingen van Bovenrijnafoeren tussen $8,000$ en $12,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Hieraan moet de onzekerheid, die wordt geïntroduceerd door het gebruik van het hydraulisch model, nog worden toegevoegd.

Metingen van afvoerverdeling rond IJsselkop

Eenzelfde procedure als hiervoor, is toegepast op de afvoerverdeling rond IJsselkop. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3-7. In de figuur is de fractie van het Pannerdensch Kanaaldebit dat door de IJssel wordt afgevoerd weergegeven als functie van de afvoer door het Pannerdensch Kanaal. De figuur laat zien dat binnen het meetbereik bij hoge afvoer ongeveer 41-42% van het Pannerdensch Kanaaldebit via de IJssel wordt afgevoerd. Ook is te zien dat de bandbreedte bij hogere afvoeren langzaam afneemt.

Gebruikt men een afvoerbereik van $Q > 2700 \text{ m}^3/\text{s}$ op het Pannerdensch Kanaal – een bereik dat overeenkomt met $Q > 8,000 \text{ m}^3/\text{s}$ op de Bovenrijn - dan is de gemiddelde waarde van fractie van de Pannerdensch Kanaalafvoer naar de IJssel 0.411 met een standaardafwijking van 0.0063 (2 x 11 afvoermetingen uit de periode 1976-1995). Maximaal volgt hieruit een onzekerheid in de afvoerverdeling op IJsselkop van $37 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij een relatieve meetfout van 1% in de afvoermetingen vindt men dan volgens (3.1) een onzekerheid in de afvoerverdeling bij IJsselkop van $35 \text{ m}^3/\text{s}$. De beleidsmatige afvoer naar de IJssel bij MHW

bedraagt 42.19% van het debiet door het Pannerdensch Kanaal, d.w.z. $2464 \text{ m}^3/\text{s}$. Genoemde onzekerheid bedraagt dus ongeveer 1.5 % van de MHW-afvoer.



Figuur 3-7 Fractie van het debiet door het Pannerdensch Kanaal dat via de IJssel wordt afgevoerd als functie van de afvoer door het Pannerdensch Kanaal

4 Analyse met aanvullende gegevens

4.1 Inleiding

De MHW-berekeningen worden uitgevoerd met WAQUA voor een rivier die is ingericht volgens de toestand behorende bij het begin van de vijfjarige periode waarvoor de berekende waterstanden van toepassing zijn. De ijking en verificaties worden uitgevoerd op hoogwatergolven met de daarbij behorende inrichting van de rivier. Bij de ijking wordt getracht de waterstand binnen een tijdsvenster rond de piek zo nauwkeurig mogelijk te simuleren. Hierbij wordt voor de ecotopen in de uiterwaard de ruwheidswaarde uit het Handboek ‘Stromingsweerstanden vegetatie in uiterwaarden’ gehanteerd; alleen de ecotopenverdeling kan per ijking/verificatie verschillen. Voor de effectieve viscositeit wordt ongeacht locatie of afvoerniveau een vaste waarde van $1 \text{ m}^2/\text{s}$ aangehouden. De verschillen tussen de gemeten en berekende waterstanden rond de top van de hoogwatergolf worden geminimaliseerd door de ruwheid van het zomerbed aan te passen, die daarmee compenseert voor alle fouten in waarnemingen van afvoer en waterstand, geometrie en inrichting, uiterwaard ruwheid en viscositeit. Vervolgens wordt met het model met de aangenomen en geijkte ruwheidswaarden de MHW-standen vastgesteld voor de mediane hoogwatergolf met een piekafvoer bij Lobith van $16,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Er wordt, anders dan voorheen, vervolgens geen correctie uitgevoerd om de berekende afvoerverdeling op de splitsingspunten aan te passen aan de beleidsmatige verdeling. Effecten van wind, morfodynamiek, bodemaanpassing in de HR-periode en falen van kades en/of overlaten worden niet meegenomen.

In dit hoofdstuk worden de resultaten uit voorgaande studies nader geanalyseerd en aangevuld met resultaten van analyses van aanvullende informatie om de orde van grootte van de onzekerheid in de afvoerverdeling op de splitsingspunten te kwantificeren. Uitgangspunt zijn de onzekerheidsbronnen die door Schropp (2002) zijn geïdentificeerd:

1. wind
2. golfvorm en morfodynamiek
3. falen van kades en overlaten
4. verandering riviergeometrie
5. hydraulische ruwheid van het zomerbed
6. hydraulische ruwheid van de uiterwaard
7. modelonzekerheden.

Naast aandacht voor de grootte van de onzekerheid in de afvoerverdeling die door de bron wordt gegenereerd wordt ook de samenhang met andere bronnen geanalyseerd. Bij de modelonzekerheden wordt met name ook aandacht besteed aan de analyses die in het kader van de MHW-berekeningen voor HR2006 zijn gemaakt.

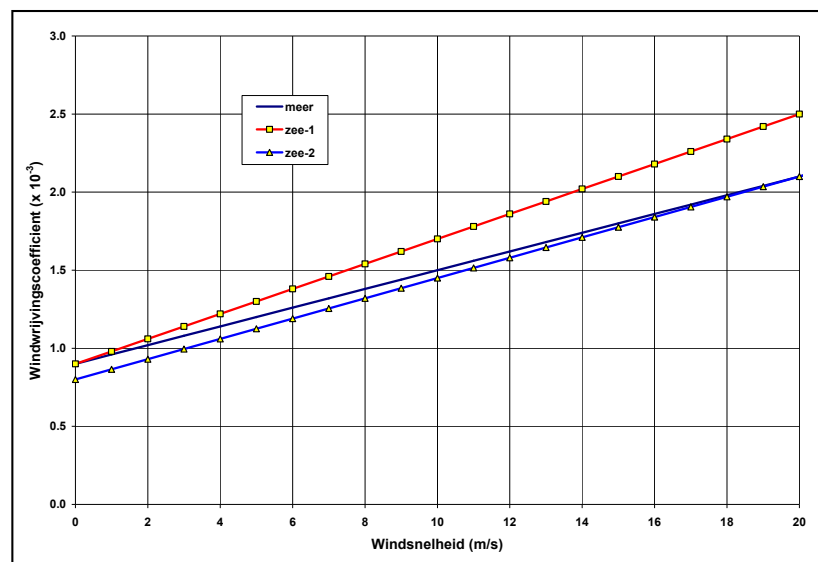
4.2 Wind

In Schropp (2002) (zie Sectie 3.3) is het windeffect op de afvoerdeling bepaald voor een windsnelheid als functie van de richting conform de Leidraad. Bij windeffectberekeningen zijn belangrijke invoergrootheden:

1. windwrijvingscoëfficiënt
2. beschuttingsfactor
3. windsnelheid, en
4. windrichting

Windwrijvingscoëfficiënt

De windwrijvingscoëfficiënt is samengesteld uit een constante plus een factor maal de windsnelheid. De in de literatuur aanbevolen waarden voor zee- en meeroppervlakken zijn weergegeven in Figuur 4-1. Voor de gegeven windsnelheden verschillen de coëfficiënten voor zeeoppervlakken onderling tussen de 10 en 20%. In de berekeningen van Schropp (2002) zijn de coëfficiënten voor meeroppervlakken genomen, die zich tussen de waarden voor zeeoppervlakken bevinden. Van een grote onzekerheid in de keuze van de parameters lijkt dus geen sprake te zijn.



Figuur 4-1 Windwrijvingscoëfficiënt voor meren en zeeën als functie van de windsnelheid

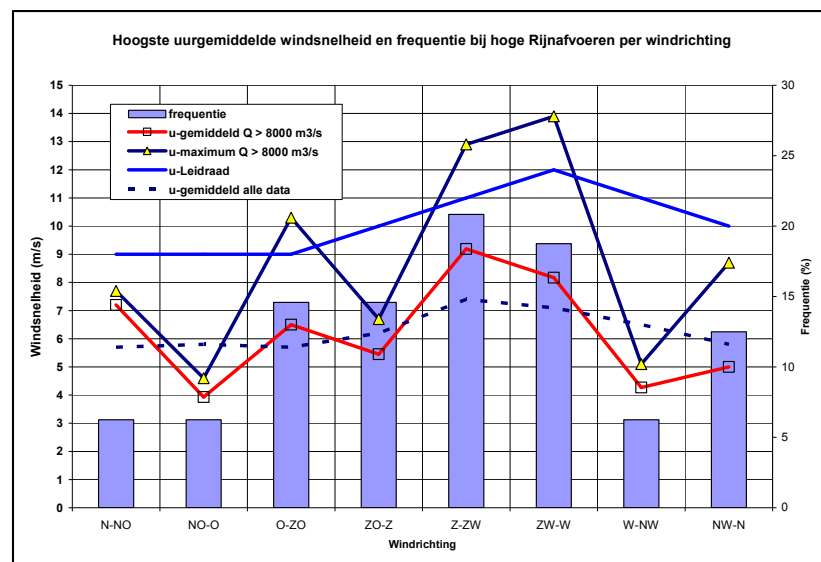
Beschuttingsfactor

Bij MHW staat de waterspiegel tot aan de kruin van de dijk zodat van enige beschutting geen sprake is. De in de berekeningen aangehouden defaultwaarde van 1 is daarmee in overeenstemming.

Windsnelheid en windrichting

De windsnelheden als functie van de windrichting in de windopzetberekeningen zijn volgens de leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, maar zijn voor een ander doel ontworpen. De waarden, afgeleid van het windklimaat van Deelen en Herwijnen tussen 1971 en 1980 (Cappendijk et al, 1985), zijn zo bepaald dat in een dijkkring bij gegeven kruinhoogte de kans dat de maximaal toelaatbare hoeveelheid golfoverslag bij waterstanden $\leq$ MHW wordt overschreden een orde kleiner is dan de overschrijdingsfrequentie van de afvoer, d.w.z. $< 1/10 \times 1/1250 = 1/12.500$. Er is daarbij aangenomen dat windsnelheid en rivierafvoer onafhankelijk zijn van elkaar.

Deze leidraadwindsnelheid is als functie van de windrichting in Figuur 4-2 vergeleken met het gemiddelde en het maximum van de hoogste uurgemiddelde windsnelheid voor alle dagen tussen 1901 en 2000 dat de piekafvoer op de Bovenrijn bij Lobith groter was dan $8000 \text{ m}^3/\text{s}$. De windgegevens zijn genomen uit het KNMI-bestand voor de Bilt (voor de dag van de piekafvoer en de dag erna) en zijn gecorrigeerd naar een meethoogte van 10 m, conform de eisen die worden gesteld voor geldigheid van de windwrijvingscoëfficiënten. Als referentie is ook het gemiddelde van de hoogste uurgemiddelde windsnelheid per windrichting voor alle dagen tussen 1901 en 2000 in de figuur aangegeven.

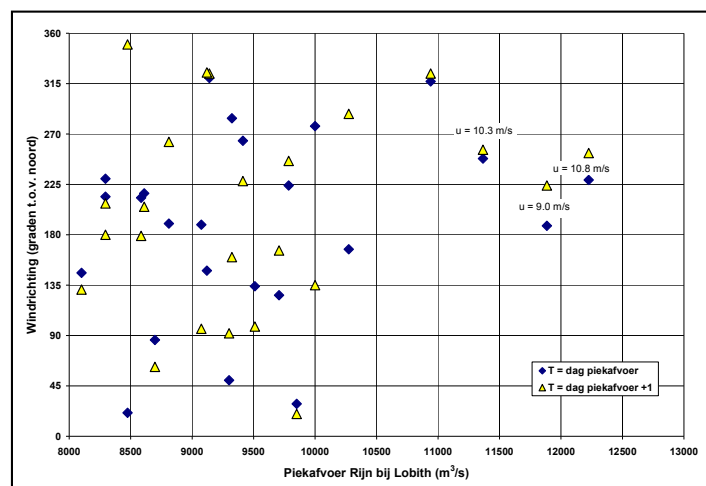


Figuur 4-2 Windsnelheid (gemiddelde en maximum) en frequentie van de windrichting te De Bilt bij piekafvoeren op de Rijn groter dan $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ met de windsnelheid als functie van de richting volgens de Leidraad

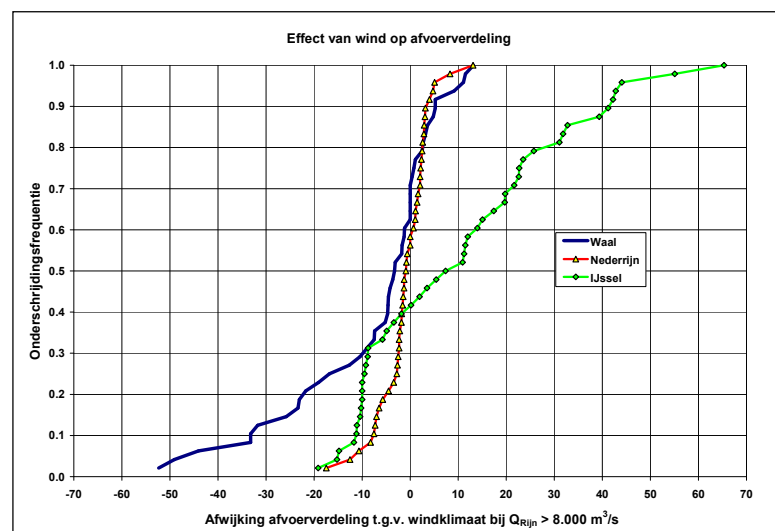
De figuur laat zien dat de windsnelheden die in de Leidraad worden gehanteerd geen zeer extreme waarden vertegenwoordigen en bij extreme Rijnafoeren in de twintigste eeuw enkele keren zijn overschreden. De overheersende windrichting bij piekafvoeren ligt tussen zuid en west, maar andere richtingen komen ook voor.

De relatie tussen de windrichting en de hoogte van de piekafvoer is weergegeven in Figuur 4-3. De figuur toont aan dat bij zeer hoge piekafvoeren de windrichting steeds ongeveer zuidwest is geweest met windsnelheden die variëren van 9 tot 11 m/s (vrij krachtige tot krachtige wind). De windrichting bij extreme afvoeromstandigheden is conform de verwachting: grote hoeveelheden vochtige oceanische lucht van voor de winterperiode relatief hoge temperatuur zijn nodig voor uitgestrekte neerslag met sneeuwmelt in het midden- en benedenstroomgebied van de Rijn. De daarbij opgetreden windsnelheden liggen slechts weinig onder de waarden die in de leidraad staan (12 m/s tegenover 9 – 11 m/s) en zijn hoger dan de gemiddelde waarden.

Met behulp van de berekende effecten van windsnelheid en windrichting uit de leidraad op de afvoerverdeling, zoals beschreven in Schropp (2002), is voor het waargenomen windklimaat tussen 1901 en 2000 bij piekafvoeren op de Rijn $Q > 8,000 \text{ m}^3/\text{s}$ het effect op de afvoer op de Waal, Nederrijn en IJssel bepaald. Impliciet wordt op deze manier mogelijke correlatie tussen windsnelheid, windrichting en piekafvoer in kaart gebracht. Het resultaat is weergegeven in Figuur 4-4 en Tabel 4-1.



Figuur 4-3 Relatie tussen piekafvoer op de Rijn en windrichting te De Bilt op de dag van de passage van de piek en op de volgende dag



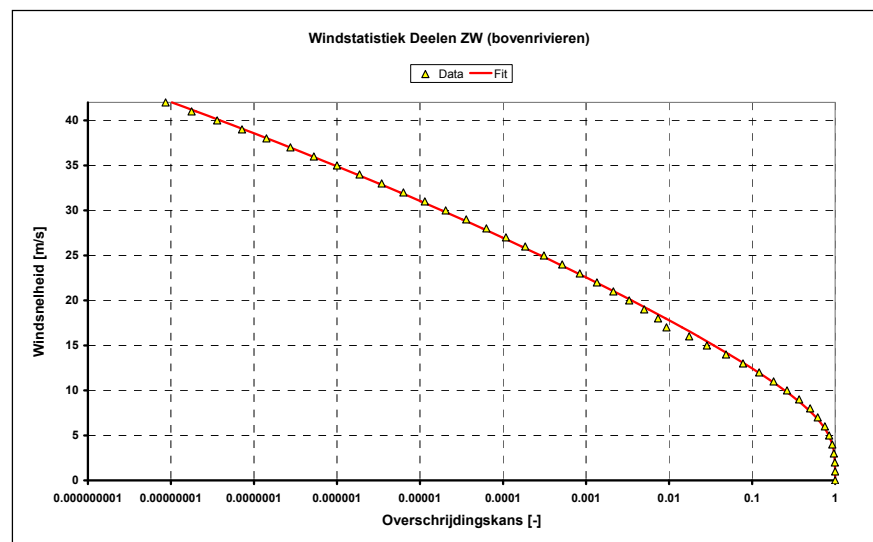
Figuur 4-4 Effect van wind op de afvoerverdeling bij MHW voor het windklimaat bij $Q_{\text{Rijn}} > 8000 \text{ m}^3/\text{s}$

De orde van grootte van het 90% onzekerheidsinterval is nu iets kleiner dan in Sectie 3.3 is berekend voor de windsnelheid en windrichting volgens de Leidraad (vergelijk Tabel 3-4 met Tabel 4-1). Gezien de geringe grootte van de onzekerheid zal zij als onafhankelijke factor slechts een marginaal effect hebben op de totale onzekerheid in de afvoerverdeling. Incidenteel kan wind de kwaliteit van de ijking van het hydraulisch model beïnvloeden omdat wind niet wordt meegenomen in de calibratie. Indien, zoals in januari/februari 1995, er wel sprake is van krachtige wind zullen deze effecten worden verdisconteerd in de ruwheid van het zomerbed.

Tabel 4-1 Effect van wind op de afvoerverdeling (m^3/s) bij MHW voor het windklimaat bij $Q_{\text{Rijn}} > 8000 \text{ m}^3/\text{s}$

Riviertak	90% Onzekerheidsband (m^3/s)	Onzekerheid σ (m^3/s)
Waal	-44 tot 11	17
Nederrijn	-15 tot 5	6
IJssel	-12 tot 44	17

In Schropp (2002) is voorts aangegeven, dat bij windsnelheden van 25 m/s en hoger het effect op de afvoerverdeling zeer groot wordt, met grote gevolgen voor de IJssel bij wind uit richtingen tussen zuid en west. De kans van voorkomen van dergelijke windsnelheden is in figuur 4-5 weergegeven voor station Deelen.



Figuur 4-5 Windstatistiek Deelen voor zuidwestenwind, overschrijdingskans van windsnelheden

De figuur geeft aan dat de kans van voorkomen van dergelijke windsnelheden kleiner is dan 1/1000, zodat met de veronderstelde onafhankelijkheid tussen windsnelheid en rivierafvoer er slechts een extreem kleine kans is dat een MHW-afvoer samenvalt met zeer hoge windsnelheden. Eerder is overigens aangetoond dat hoge windsnelheid en piekafvoer meer samenvallen dan op basis van onafhankelijkheid verwacht mocht worden.

4.3 Golfvorm en morfodynamiek

Correlatie golfvorm en morfodynamiek

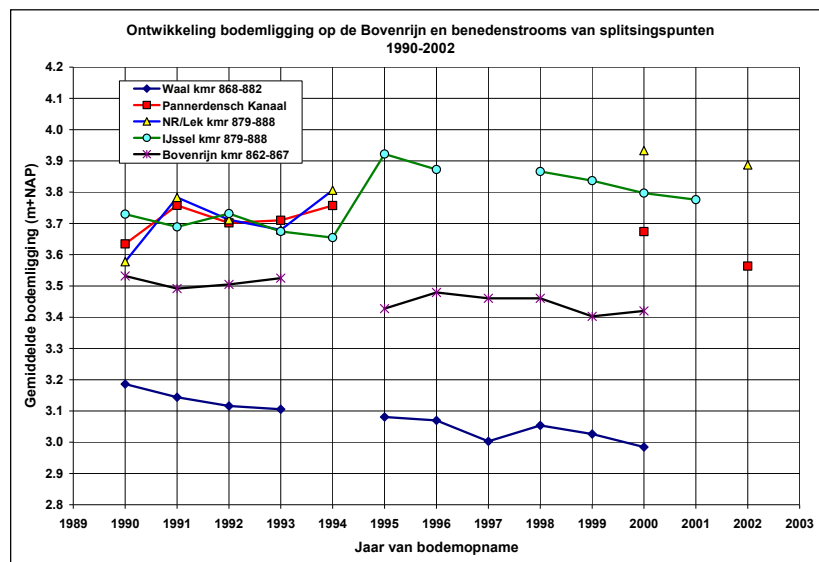
In Sectie 3.3 zijn de resultaten van de berekeningen van effecten van golfvorm en morfodynamiek, die door Schropp (2002) zijn uitgevoerd, weergegeven, zie Tabel 3-5 en Tabel 3-6. De effecten zijn volledig gecorreleerd, d.w.z. dat de aangegeven grenzen voor overeenkomende onderschrijdingskansen van golfvorm opgeteld mogen worden. Dit geeft het resultaat als vermeld in Tabel 4-2. De tabel geeft aan dat voor een mediane golf (de MHW-golf) er systematische verschillen ontstaan: minder afvoer naar de Waal en meer afvoer naar het Pannerdensch Kanaal, die vooral via de Nederrijn en minder via de IJssel wordt afgevoerd. T.a.v. de morfologische effecten moet worden opgemerkt dat de berekeningen zijn uitgevoerd met een foutief gecalibreerd model, met te hoge transporten en te grote voortplantingssnelheden van bodemverstoringen. Dit duidt erop dat de morfologische effecten van de passage van een MHW-golf door het model worden overschat. Helaas was onvoldoende tijd beschikbaar om de berekeningen voor de MHW-golven te herhalen met het herijkte morfologisch model.

Tabel 4-2 Gecombineerd effect van golfvorm en morfodynamiek

Tak	Golfvorm P=0.025	Golfvorm P=0.50	golfvorm P=0.975	Onzekerheid σ
Waal	-19	-75	-173	39
Pannerdensch Kanaal	-42	75	194	59
Nederrijn	-24	55	147	43
IJssel	-47	20	55	26

Waargenomen veranderingen in de bodemligging

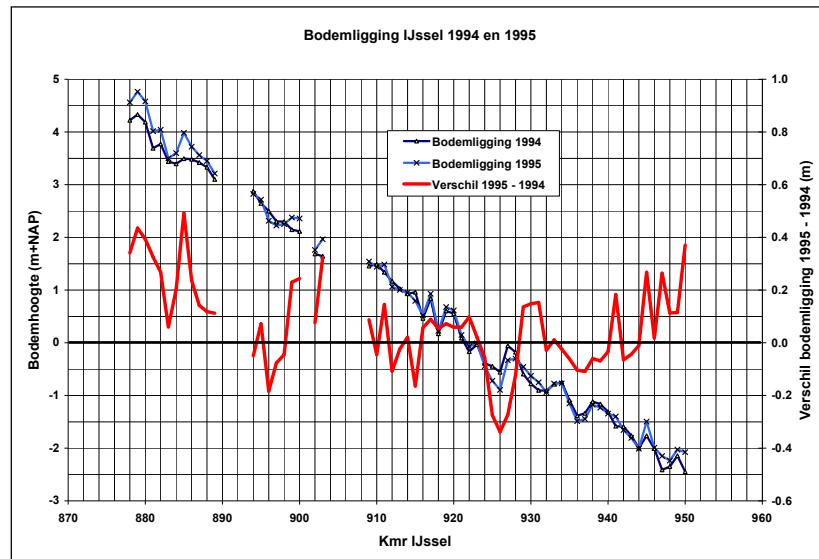
Om te onderzoeken of bij de passage van hoogwatergolven inderdaad sprake is van sterke morfologische activiteit die de afvoerverdeling beïnvloedt, is de ontwikkeling van de bodem van het zomerbed in de bovenlopen van de Waal, Nederrijn en IJssel en van het Pannerdensch Kanaal sinds 1990 nader geanalyseerd. In deze periode zijn enkele forse hoogwater opgetreden, zoals in 1993 en in 1995. In Figuur 4-6 is aangegeven wat de orde van grootte is waarmee bodem-veranderingen zich manifesteren.



Figuur 4-6 Ontwikkeling bodemligging van het zomerbed op de Bovenrijn en benedenstrooms van de splitsingspunten, periode 1990-2002, op basis van single beam opnames.

Het volgende wordt hierbij opgemerkt:

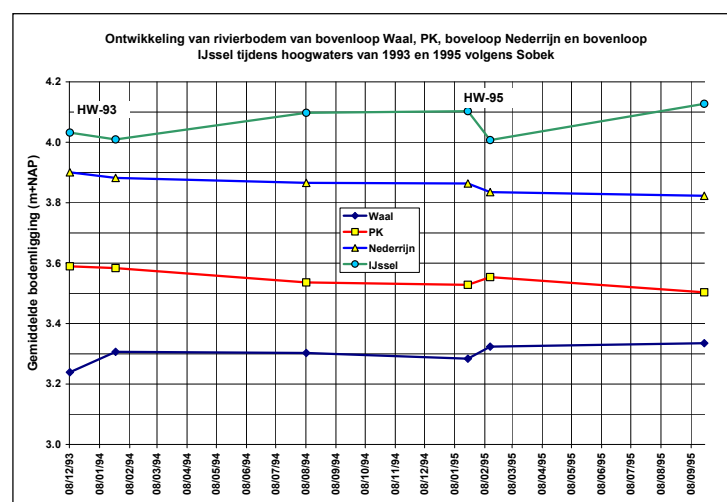
1. Volgens de peilingen is op de Bovenrijn en de Waal sprake van een doorgaande verlaging van ca. 0.02 m/jaar. Tussen 1993 en 1995 is de bodem van de Bovenrijn met ongeveer 1 dm gedaald, sterker dan de bovenloop van de Waal.
2. Het beeld voor het Pannerdensch Kanaal is wisselend. Hier ontbreekt helaas de periode 1995-1999; de peilingen voor die periode zijn door de meetdienst afgekeurd. De peiling van 2002 geeft een verlaging van het zomerbed te zien t.o.v. 2000 en vooral t.o.v. de eerste helft van de negentiger jaren van ongeveer 0.1 – 0.2 m.
3. De bovenloop van de IJssel laat een sterke stijging zien in 1995 van orde 0.3 m. De aanzanding op de eerste 10 km van de IJssel zoals die zich manifesteert tussen 1994 en 1995 zou een gevolg van de passage van het hoogwater van januari-februari 1995 kunnen zijn. Figuur 4-7 geeft aan dat de stijging zich inderdaad alleen in de bovenloop van de IJssel heeft voorgedaan. Het houdt een onwaarschijnlijk hoog sedimenttransport van 240,000 m³/jaar in naar de IJssel.
4. Of eenzelfde effect als op de IJssel zich op de Nederrijn ook heeft voorgedaan is op basis van de peilingen niet te zeggen, ook hier ontbreekt de periode 1995-1999. De peilingen in 2000 en 2002 sluiten een analoog gedrag niet uit.
5. Op basis van deze bodempeilingen is weinig te zeggen over de gevolgen voor de afvoerverdeling; immers, indien zich op de Nederrijn tussen 1994 en 1995 eenzelfde aanzanding heeft voorgedaan als op de IJssel, dan heeft dat voor de verdeling van de afvoer over de IJsselkop weinig consequenties.



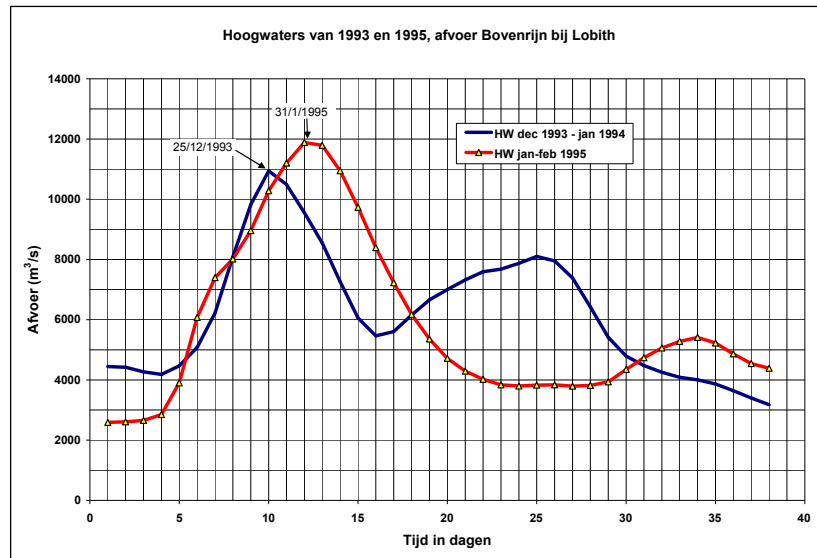
Figuur 4-7 Bodemligging IJssel in 1994 en 1995 met het verschil tussen de peilingen.

Simulatie van morfologische ontwikkeling tijdens en na HWI 1993 en HWI 1995

Met behulp van het herijkte morfologische model is ook berekend welk effect de passage van de hoogwatergolven van 1993 en 1995 op de bodemligging van de Rijntakken heeft. Het resultaat, voor dezelfde trajecten als in Figuur 4-6 zijn beschouwd, is weergegeven in Figuur 4-8. De hoogwatergolven zijn afgebeeld in Figuur 4-9. Deze laatste figuur geeft aan dat de afvoergolf in 1995 hoger was dan die in 1993 en langer een afvoerniveau van 8,000 m³/s heeft overschreden: 8.5 dag in 1995 tegen 5.5 dag in 1993. Van de hoogwatergolf van 1995 mag men daarom een groter morfologisch effect verwachten. Bij de MHW-golf is de overschrijdingsduur van 8,000 m³/s ongeveer 20 dagen, d.w.z. meer dan twee keer de duur van de 1995 golf. Over de resultaten van de morfologische berekeningen kan het volgende worden opgemerkt:



Figuur 4-8 Resultaten van morfologische berekeningen van de bodemligging van de Rijntakken voor de jaren 1993-1995



Figuur 4-9 Bovenrijnafvoer bij Lobith tijdens hoogwaters van december 1993-januari 1994 en januari-februari 1995

1. Op de Waal treedt aanzanding op tijdens de passage van de hoogwatergolven, die daarna niet volledig wordt geëlimineerd. Omdat de peilingen voor de Waal uit 1994 niet beschikbaar zijn is hier niet na te gaan of het model de werkelijkheid goed weergeeft. De peilingen geven wel aan dat de Waal tussen 1993 en 1995 minder gedaald is dan de Bovenrijn. Of de aanzanding tijdens de passage ook zorgt voor verminderde afvoer via de Waal hangt af van het gedrag van de bodem op het Pannerdensch Kanaal.
2. Op het Pannerdensch Kanaal is sprake van een doorgaande daling met uitzondering van de periode van de passage van de afvoergolf van 1995. Deze laatste stijging is minder dan op de Waal, zodat mag worden verwacht dat de afvoer richting Pannerdensch Kanaal iets toeneemt ten koste van de Waal. Bij het hoogwater van 1993 is het verschil sterker. Deze trend van meer water richting Pannerdensch Kanaal is uiteraard in lijn met de berekeningen voor de MHW-afvoergolven.
3. Op de Nederrijn is sprake van een doorgaande daling, die iets sterker is bij de passage van de hoogwatergolven.
4. De bodem van de bovenloop van de IJssel reageert het sterkst. Vooral bij de passage van de golf van 1995 vindt een uitschuring plaats van orde 1 dm. Dit lijkt volstrekt in tegenspraak met de waargenomen bodemontwikkeling tussen 1994 en 1995 zoals is afgebeeld in Figuur 4-6. Echter met enig voorbehoud. Immers, de berekeningen geven aan dat na de passage van de golf er weer snel sprake is van aanzanding. Er zijn dus in de simulatie tijdstippen te vinden die duiden op een aanzanding tussen 1994 en 1995, echter niet in die mate als is waargenomen.

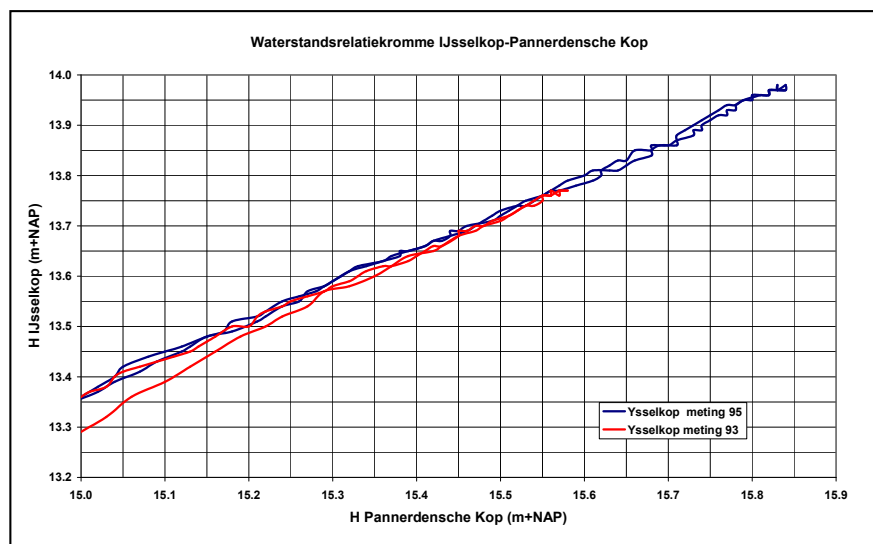
Merk overigens op dat de waargenomen bodemliggingen in 1994 op het Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel zich gemiddeld tussen 3.65 en 3.89 m + NAP bevonden, terwijl in het model de bodem van Pannerdensch Kanaal orde 3 dm lager ligt en die van de IJssel 4 dm hoger dan is waargenomen. Aangezien het hier om verschillen gaat per traject, zijn de absolute afwijkingen van minder belang.

Uit het voorgaande blijkt dat bij afvoeren als in 1993 en 1995 geen grote veranderingen te verwachten zijn in de bodemligging rond de splitsingspunten en nog minder in de afvoerdeling omdat de veranderingen in de bodemligging benedenstrooms van de splitsingspunten dezelfde kant uitwijzen. Dit laatste is natuurlijk mede een gevolg van de

aangenomen sedimentverdeling op de splitsingspunten. Essentiële bodeminformatie op cruciale momenten ontbreekt echter om de kwaliteit van het model als voorspeller van morfologische verandering bij de passage van een zeer hoge afvoergolf te toetsen.

Waterstandrelaties

Een andere manier om te onderzoeken of sprake is geweest van grote bodemveranderingen in het Pannerdensch Kanaal en benedenstrooms van IJsselkop is door de ontwikkeling van de waterstandrelatiekrommen tussen Pannerdensch Kop en IJsselkop te onderzoeken, zie Figuur 4-10.

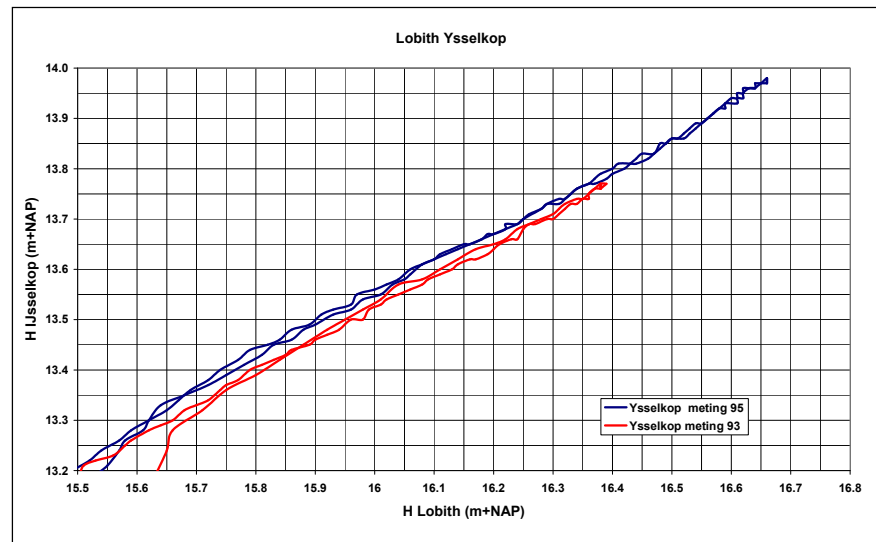


Figuur 4-10 Waterstandrelatiekrommes IJsselkop-Pannerdensch Kop, hoogwaters van 1993 en 1995

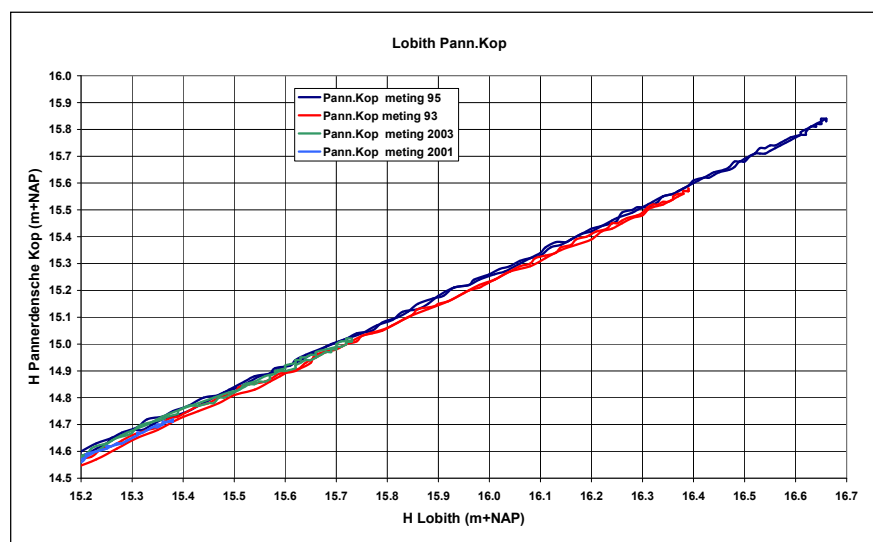
Door een tijdverschuiving toe te passen van 2 uur i.v.m. de looptijd van de hoogwatergolf van Pannerdensch Kop naar IJsselkop, om de hysteresis in de waterstandrelatie te elimineren, wordt nabij de top per golf een eenduidig verband verkregen tussen de waterstanden op beide locaties. De figuur laat zien dat de top van de golf van 1993 vrijwel exact op de relatie voor 1995 valt. Dit houdt in dat de capaciteiten van het Pannerdensch Kanaal en de bovenloop van de Waal enerzijds en van de bovenloop van de Nederrijn en de IJssel anderzijds in relatieve zin niet gewijzigd zijn. Dit betekent niet dat er geen sprake is geweest van morfologische ontwikkeling, maar in ieder geval van een morfologische ontwikkeling die qua trend in 1995 niet anders is geweest dan in 1993.

De relatiekromme tussen Lobith en IJsselkop (Figuur 4-11) laat ook een vrij stabiel beeld zien: er is slechts sprake van verschuiving van orde 3 cm ($\approx 25 \text{ m}^3/\text{s}$ op de IJssel). De verschuiving duidt erop dat de bodem benedenstrooms van IJsselkop t.o.v. de Bovenrijn in 1995 iets gestegen is. Tussen 1993 en 1995 is de bodem van de Bovenrijn volgens de peilingen ongeveer 1 dm gedaald. Helaas ontbreken de peilingen van 1994, zodat niet bekend is hoe de twee hoogwaters afzonderlijk het rivierbed hebben aangepast. De relatiekrommes laten evenwel zien dat een verhoging van het rivierbed van de bovenloop van de IJssel met 3 dm twijfelachtig is. Het verdient aanbeveling het gedrag van de waterstandrelaties uit de resultaten van het morfologisch model te vergelijken met de waargenomen relaties.

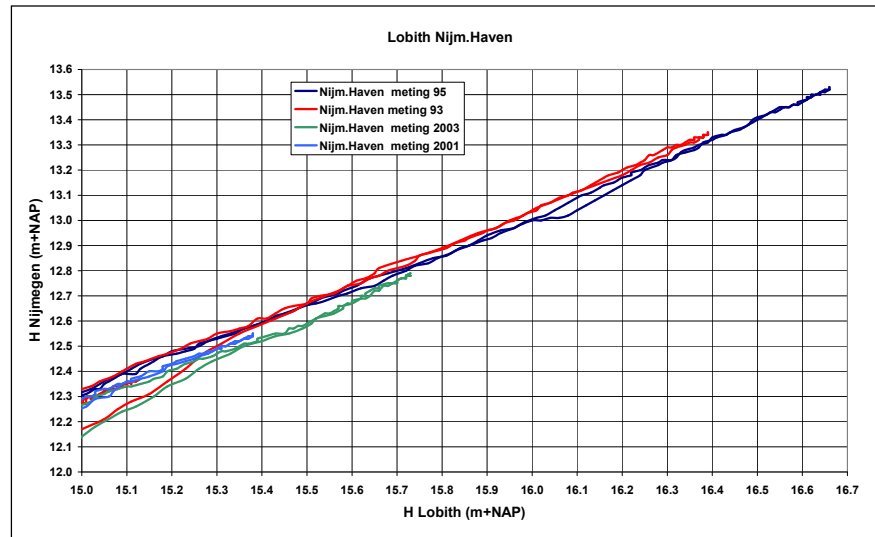
Ook andere waterstandrelaties duiden op een stabiele situatie rond de splitsingspunten, zoals in de navolgende Figuren 4-12 tot 4-14 is aangetoond. Dat de relatie tussen Lobith en Pannerdensch Kop zeer stabiel is, is niet zo vreemd; de stations zijn slechts 5 km van elkaar verwijderd, zodat de benedenstroomse condities, die de waterstand bij de Kop bepalen, deels ook die bij Lobith bepalen. Echter, de waterstandrelaties tussen Lobith en Nijmegen en Lobith en Tiel vertoont bij zeer hoge afvoer ook weinig variatie. Naast de afvoerverdeling zit er dus kennelijk ook geen grote verandering in de hydraulische ruwheid bij extreme afvoer.



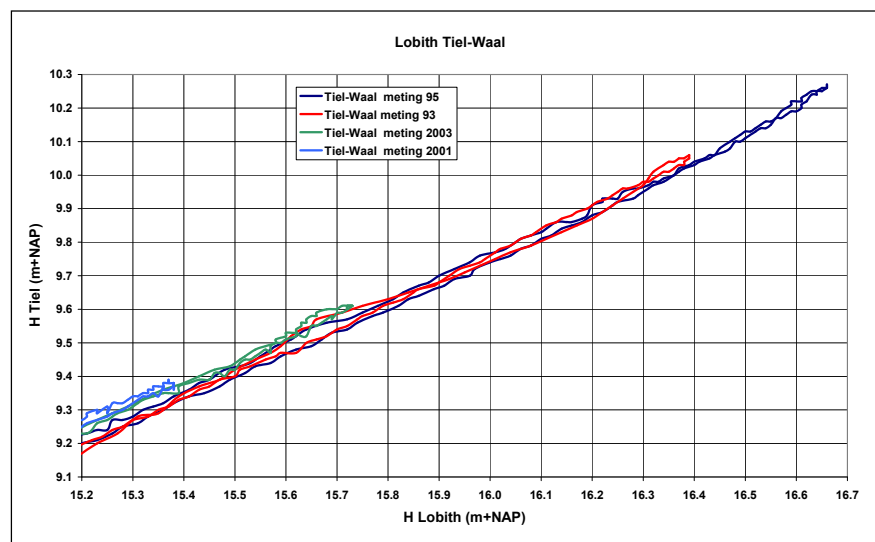
Figuur 4-11 Waterstandrelatiekrommes IJsselkop-Lobith, hoogwaters 1993 en 1995



Figuur 4-12 Waterstandrelatiekrommes Pannerdensch Kop-Lobith, hoogwaters 1993, 1995, 2001 en 2003



Figuur 4-13 Waterstandrelatiekrommes Nijmegen Haven-Lobith, hoogwaters 1993, 1995, 2001 en 2003



Figuur 4-14 Waterstandrelatiekrommes Tiel-Lobith, hoogwaters 1993, 1995, 2001 en 2003

Conclusie

Samenvattend kan worden gesteld dat de geringe veranderingen in de bodemligging en de afvoerverdeling, die met het morfologisch model voor hoge afvoer worden voorspeld, bevestigd worden door de geringe veranderingen in de waterstandrelaties. T.o.v. de MHW-golf zijn de opgetreden hoogwaters qua transportvermogen echter klein en essentiële bodeminformatie ontbreekt echter om de kwaliteit van het model als voorspeller van morfologische verandering bij de passage van een zeer hoge afvoergolf goed te toetsen. De resultaten van de afvoerverandering, die met het morfologisch model zijn berekend, blijven dus onzeker. Hierbij moet worden aangetekend dat de passage van een enkele hoogwatergolf slechts een beperkt effect op de afvoerverdeling kan hebben, omdat niet meer dan een verplaatsing van orde 1 km te verwachten is, terwijl de afvoerverdeling wordt bepaald door de eerste 10 á 15 km rivier benedenstrooms van de splitsing.

De berekeningen tonen aan dat naast een onzekerheid ook een onzuiverheid (bias) wordt geïntroduceerd door morfologische effecten omdat de afvoergolven waarop het hydraulisch model geijkt is relatief van korte duur zijn t.o.v. de mediane MHW-golf. Op basis van het verschil in overschrijdingsduur van het 8,000 m³/s niveau tussen de calibratiegolf en de MHW-golf dient met een onzuiverheid van de helft van het aangegeven morfologisch effect bij P = 0.50 in Tabel 4-2 rekening te worden gehouden.

4.4 Falen van kades en overlaten

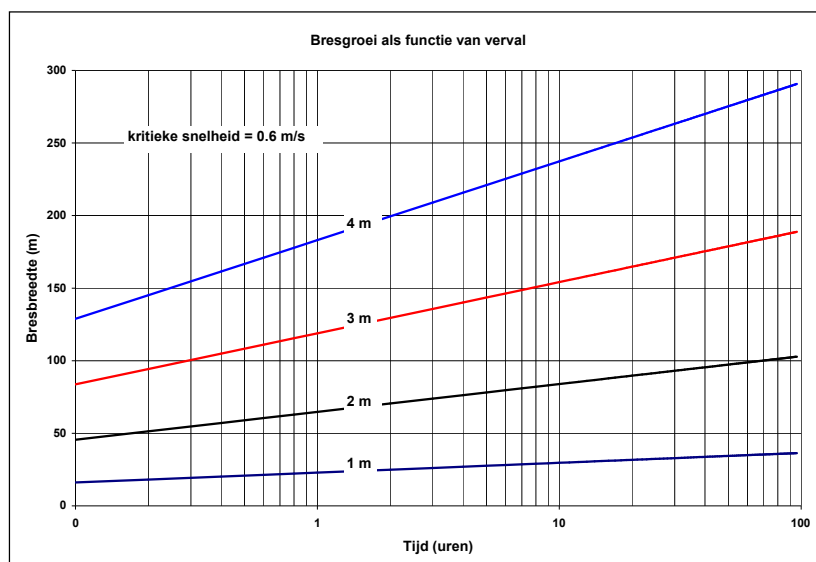
Bij de berekening van het effect van kades en overlaten in Schropp (2002) zijn aannames gemaakt over de breedte van de bres in de constructie terwijl voorts is aangenomen dat per hoogwater niet meer dan één kade/overlaat faalt. Dat laatste is in overeenstemming met de historie van falende kades/overlaten in het verleden. T.a.v. de breedte van de bres bij falen zijn waarden aangenomen variërend van 32 m voor de Pannerdensche overlaat tot 210 m voor de Suikerdam. Voor die kades/overlaten, die in de berekeningen een relatief groot effect hebben op de afvoerverdeling, is een schatting gemaakt van de bresbreedte op basis van de bresgroeiformule van Verheij en van der Knaap (2002). Deze formule heeft de volgende vorm:

$$B = 1.3\sqrt{g} \left(\frac{[h_{\text{boven}} - h_{\text{beneden}}]^{3/2}}{u_c} \right) \log \left(1 + \frac{0.04g[t - t_0]}{u_c} \right) \quad (4.1)$$

waarin :

- B = breedte van de bres (m)
- g = zwaartekrachtsversnelling (m/s²)
- h_{Boven} = waterstand in de rivier (m+NAP)
- h_{Beneden} = waterstand achter de kade/overlaat (m+NAP)
- u_c = kritieke stroomsnelheid voor erosie kade, geschat op 0.6 m/s
- t = tijd (s)
- t₀ = begin van erosie (s)

De formule geeft aan dat de breedte na de doorbraak zich zeer snel ontwikkelt, maar dat daarna de groeisnelheid snel afneemt, zoals aangegeven in Figuur 4-15. De kade over de Pannerdensche Kop en de Lobberdense leidam hebben het grootste effect voor de verdeling over de Kop. Voor IJsselkop is de kade rond Koningspley de belangrijkste. Het te verwachten verval en de berekende en aangenomen bresbreedte is in Tabel 4-3 aangegeven.



Figuur 4-15 Bresgroei voor verschillende vervalwaarden over de kade

Tabel 4-3 Vergelijking bresbreedte volgens formule en aangenomen in effectberekening

Kade/overlaat	Verval (m)	Bresbreedte berekend na 1 dag (m)	Bresbreedte aangenomen (m)
Kade over Pann. Kop	1-2	30-90	161
Lobberdense leidam	3	170	156
Koningspley	3-4	170-260	123

De tabel geeft aan dat alleen voor de kade rond het Koningspley de bresbreedte in de effectberekening t.o.v. formule (4.1) is onderschat, en wel met een factor 2. Om hiermee rekening te houden wordt vooruitlopend op nieuwe berekeningen het effect op de afvoerverdeling voor de Nederrijn en de IJssel voorlopig met orde 50% verhoogd tot respectievelijk -50 en +70 m³/s. De volgende onzekerheden in de afvoerverdeling zijn daarom toepassing (zie Tabel 4-4).

Tabel 4-4 Effect falen van kades/overlaten op onzekerheid in afvoerverdeling

Tak	90% interval (m ³ /s)	Onzekerheid afvoerverdeling (σ) (m ³ /s)
Waal	-64 tot +16	25
Nederrijn	- 50 tot +27	24
IJssel	-7 tot +70	24

4.5 Verandering bodemgeometrie

Door Schropp (2002) is het effect van verandering van de bodemligging op de afvoerverdeling tussen twee opeenvolgende HR's berekend door rekening te houden met een daling per tak afzonderlijk en vervolgens gezamenlijk van 1 dm. De grootte van de veranderingen komen overeen met de resultaten van bodempeilingen, zodat de in Tabel 3-8 gegeven waarden als representatief worden beschouwd.

4.6 Hydraulische ruwheid van het zomerbed

De ruwheid van het zomerbed zoals die in het hydraulisch model wordt toegepast is geijkt op de hoogwaters van 1995 en geverifieerd op het hoogwater van 1993. De procedure die hiervoor wordt gebruikt is beschreven in Sectie 4.1. Per riviertraject tussen de MSW-stations wordt een Nikuradse k-waarde bepaald. Door de gebruikte procedure worden fouten in de geometrie, inrichting en uiterwaardruwheid in de ijking weggewerkt door aanpassing van de zomerbedruwheid. De onzekerheid in de zomerbedruwheid bij MHW bevat dus twee componenten:

1. onzuiverheid door fouten in andere bronnen, die via de ijking is geïntroduceerd, en
2. onzekerheid in de beschrijving van het fysische gedrag van de zomerbedruwheid van ijkingomstandigheden naar MHW-condities.

De onzuiverheid in de zomerbedruwheid wordt besproken in Sectie 4.8. Hier wordt de onzekerheid in de zomerbedruwheid van ijkhoogwater naar MHW geschat.

In de geciteerde studies in hoofdstuk 3 is sprake van consensus in de schatting van de onzekerheid in de Chezy-waarde van het zomerbed: een 90% betrouwbaarheidsinterval van $10 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Alleen in Duits et al (1999) wordt een interval van $18 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ aangehouden, daarbij voorbijgaand aan hun eigen experts die een interval van 10 Chezy-punten hadden voorgesteld. De waarde van $18 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ lijkt vooral gebaseerd op ranges in Manning-waarden die vermeld zijn in Chow (1959) en hebben betrekking op vaag aangeduide natuurlijke waterlopen van verschillende omvang. Om de gedachten te bepalen: een afname van de k-waarde van 0.4 naar 0.2 m bij MHW op de Waal (zoals is voorgekomen tussen twee opeenvolgende HR's) leidt tot een toename in de C-waarde van 46.3 naar $51.7 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$, d.w.z. een verhoging met ruim 5 Chezy-punten of ruim 10% van de oorspronkelijke waarde.

Theorie over het gedrag van de zomerbedruwheid is gebaseerd op de relatie tussen beddingvormdimensies duin/ribbelhoogte en duin/ribbelsteiheid en de Nikuradse k-waarde. De ontwikkeling van de beddingvormdimensies van ijkhoogwater naar MHW zijn te berekenen met de formules van van Rijn (1984), die later door Julien en Klaassen (1995) zijn aangepast op basis van een grotere set data. Dit levert een MHW k-waarde op die via de White-Colebrook formule wordt vertaald in een C-waarde. De volgende sterk empirische betrekkingen voor k-waarde en duindimensies zijn van toepassing:

$$T = \frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}$$

$$T \leq 0: \quad k = 3D_{90}$$

$$T > 0: \quad k = 1.1H_d \left(1 - \exp\left(-25 \frac{H_d}{L_d}\right) \right)$$

$$\frac{H_d}{h_w} = 2.5 \left(\frac{D_{50}}{h_w} \right)^{0.3} (1 - \exp(-0.5T)) \quad (4.2)$$

$$\frac{H_d}{L_d} = 0.4 \left(\frac{D_{50}}{h_w} \right)^{0.3} (1 - \exp(-0.4T))$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12h_w}{k} \right)$$

met: T = transporttoestandparameter (-)
 θ' = dimensieloze korrelschuifspanning (-)
 θ_{cr} = dimensieloze kritische schuifspanning voor begin van beweging (-)
 k = Nikuradse ruwheidswaarde (m)
 D_{90} = korrelgrootte > 90% van fractie (m)
 H_d = duinhoogte (m)
 L_d = duinlengte (m)
 C = Chezy waarde ($m^{0.5}/s$) volgens White-Colebrook

De betrekkingen voor de duinhoogte en de duinsteilheid in (4.2) vormen een gladde overgang tussen de formules van van Rijn (1984) voor $T < 3$ en Julien et.al. (1995) voor $T > 5$, zie Ogink (2005). Voor $T > 5$ geldt voor de k -waarde: $k \propto h_w^{0.7}$. Deze waterdiepte afhankelijke relatie voor de k -waarde wordt in WAQUA toegepast. Voor waarden van $T < 3$ volgt uit (4.2) dat er sprake is van een sterke groei van de duinhoogte en daarmee van de k -waarde. Deze is sterker dan voor $T > 5$. In Tabel 4-5 is aangegeven welke waarden van T bij het ijkhoogwater en bij MHW te verwachten zijn voor de riviertrajecten die de afvoerverdeling bepalen. De consequenties voor de C -waarden in vergelijking met WAQUA zijn in de volgende kolom aangegeven, gebaseerd op bovenstaande betrekkingen.

Tabel 4-5 Waarden voor transporttoestandparameter T bij HW1995 en MHW (geschat), effect op C -waarde t.o.v. aangenomen waarde in WAQUA en onzekerheid in afvoerverdeling

Tak	T HW1995	T MHW	ΔC ($m^{0.5}/s$) WAQUA – (4.2)	Onzekerheid afvoerverdeling (σ) (m^3/s)
bovenloop Waal	4.9	4.6	0	50
Pannerdensch Kanaal	2.6	3.2	1	50
bovenloop Nederrijn	5.3	6.2	0	46
bovenloop IJssel	1.2	1.8	4	54

Uit de tabel blijkt dat de T-waarde op het Pannerdensch Kanaal en vooral op de IJssel zich in het kritieke gebied bevinden waar van aanzienlijke groei van de beddingvormen en daarmee van de k-waarde sprake zou kunnen zijn. Het gevolg is dat het model de C-waarde met enkele punten overschat. De afwijkingen vallen echter binnen de eerder aangegeven 90% betrouwbaarheidsband van $\pm 5 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Dit interval wordt daarom verder aangehouden. Hieruit is met de Monte Carlo-simulaties zoals in Sectie 3.2 is besproken - met correctie voor onzekerheid in bodemligging en in uiterwaardruwheid - een 90% betrouwbaarheidsband voor de afvoerverdeling geschat zoals in de laatste kolom van Tabel 3-3 is aangegeven. Dit interval is vertaald naar een onzekerheid in de afvoerverdeling, die is toegevoegd aan Tabel 4-5.

4.7 Hydraulische ruwheid van de uiterwaard

De hydraulische ruwheid van de uiterwaard die in het hydraulisch model wordt toegepast is conform het handboek 'Stromingsweerstand Vegetatie in Uiterwaarden', en de waargenomen ecotopenverdeling. De grootte van de onzekerheid in deze parameter is moeilijk in te schatten omdat veldmetingen naar de weerstand van de verschillende ecotopen slechts sporadisch zijn uitgevoerd. Het handboek is vooral gebaseerd op de theorie van parallel en seriegeschakelde weerstanden van ruwheidselementen, die afzonderlijk in model zijn onderzocht.

Recentelijk is gerapporteerd over metingen van de afvoerverdeling zomerbed-winterbed op de Bovenrijn en rond de splitsingspunten (Haskoning, 2005). De metingen betreffen het hoogwater van 1998 gemeten in de periode tussen 3 en 11 november. De resultaten van de metingen zijn vergeleken met de berekende afvoerverdeling volgens WAQUA (Versie C95_3). Het onderzoek toont aan dat er aanzienlijke afwijkingen bestaan tussen de metingen en het modelresultaat voor de uiterwaard, soms tot een factor 3. Hierbij moet het volgende worden aangetekend:

1. het hoogwater 1998 was een herfsthoogwater met een hogere weerstand in de uiterwaard dan voor een winterhoogwater waarop WAQUA is geijkt
2. de afvoermetingen in de uiterwaard (ADCP-metingen) vertonen een dusdanig grote spreiding per dag dat zeer ernstig getwijfeld moet worden aan de kwaliteit van de metingen.

Neemt men de metingen serieus dan zijn aanpassingen in de C-waarde met een factor orde 2 nodig om het WAQUA resultaat in overeenstemming te brengen met de daggemiddelde waarden van de metingen. Onvoldoende meetdetails worden in het rapport gegeven om de oorzaken van de meetvariatie aan te kunnen geven.

Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat een variatie van 50% in de k-waarde voor de uiterwaardruwheid zoals is aangenomen door Schropp (2002) een redelijke schatting is van de onzekerheid. Dit levert ongeveer eenzelfde range op in de C-waarde als voor het zomerbed is toegepast: $\pm 4.5 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Op basis van de vergelijking met de metingen lijkt dit een te kleine range. Echter, verschillen in waterstand worden gecompenseerd door aanpassing van de ruwheid van het zomerbed. Voorts wordt de ruwheid van de uiterwaard vooral bepaald door de ecotoop productiegroenland, die in de extrapolatie van calibratiehoogwater naar MHW weinig verandering zal ondergaan. Dit leidt tot de volgende onzekerheid in de afvoerverdeling, zie Tabel 4-6. De onzekerheid is gebaseerd op een variatie in de k-waarde in een tak afzonderlijk. Dit is een extreme situatie. In de praktijk

zullen de afwijkingen zich in dezelfde richting voordoen over alle takken tegelijk (herfsthoogwater tegenover winterhoogwater); dan zijn de effecten op de afvoerverdeling over de splitsingspunten veel kleiner.

Tabel 4-6 Effect 50% variatie k-waarde uiterwaard op onzekerheid in de afvoerverdeling

Tak	Range (m ³ /s)	Onzekerheid (m ³ /s)
Waal	-116 tot 139	78
Nederrijn	-72 tot 87	48
IJssel	-67 tot 55	37

4.8 Modelonzekerheden

Met modelonzekerheden wordt bedoeld onzekerheden die het gevolg zijn van:

1. fouten in de schematisatie, zoals de geometrie, inrichting van de rivier, ruwheid van de uiterwaard en kribvak bij de calibratie en
2. de representativiteit van het calibratiehoogwater.

Een goed inzicht in het effect van fouten in de schematisatie en veranderingen in de inrichting wordt verkregen uit de vershilanalyse toetspeilen HR2001-HR2006 (Van Velzen en Stolker, RIZA werkdokument 2006). Hierbij is een aantal rubrieken onderscheiden om de verschillen aan te geven, zie Tabel 4-7. Er is hier voor gekozen om de effecten afzonderlijk te beschouwen en geen sommatie per rubriek uit te voeren, omdat de bronnen onafhankelijk van elkaar zijn. De range die zo wordt verkregen is beschouwd als een 90% betrouwbaarheidsband voor alle bronnen.

Onzekerheden in de representativiteit van het hoogwater zijn deels veroorzaakt omdat wind en morfodynamiek niet in de modelberekeningen worden meegenomen. Die worden bij de schatting van de onzekerheid hiervoor apart in beschouwing genomen. Verder betreft het een mogelijke onzuiverheid in de zomerbedruwheid én door fouten buiten de zomerbedruwheid én door ijking op een hoogwater waarbij door naijlingseffecten de zomerbedruwheid zich nog niet aan de heersende stromingsomstandigheden heeft aangepast. Dit kan zich vooral in het gebied rond de splitsingspunten voordoen gezien de relatief lage waarden van de transporttoestandparameter T . Aangezien alle takken zich ongeveer in deze T -range bevinden is eenzelfde effect op alle takken te verwachten, waardoor het effect op de afvoerverdeling beperkt blijft. De onzekerheid die hiermee wordt geïntroduceerd wordt voorlopig gesteld op 50% van de onzekerheid in de extrapolatie van de zomerbedruwheid, d.w.z. 25 m³/s.

Tabel 4-7 Effect van schematisatiefouten/veranderingen op de afvoerverdeling

Soort	Bron	Waal	PK	Nederrijn	IJssel
Aanpassen van fouten in toetspeilen 2001	Verbetering kribgegevens	4	-1	1	-2
	Schematisatie	40	-39	-28	-15
	Verfijning rooster	-23	23	10	13
Verandering methoden, technieken en inzichten	Vegetatie handboek + turb visc	71	-69	-46	-21
	Diepte plassen + aanp. kades	-7	5	-2	6
	Laterale toestroming	0	0	0	0
Verandering geometrie en inrichting	Zomerbedbodem	-1	0	-32	35
	Kades/overlaten	-3	-7	3	-6
	Aanleg Millingerdam	-11	19	13	7
	Bodem winterbed	-11	13	74	-61
	Verandering vegetatie	-30	33	5	26
Range		-30 tot 71	-69 tot 33	-46 tot 74	-61 tot 35
Onzekerheid σ		31	31	37	30

5 Onzekerheid in de afvoerverdeling

De bronnen, die bijdragen aan de onzekerheid in de afvoerverdeling bij MHW zijn in Tabel 5-1 samengevat onder de volgende hoofden:

1. onzekerheid t.g.v. natuurlijke variabiliteit, en
2. onzekerheid in de extrapolatie t.g.v. modelgebruik.

De bronnen zijn met uitzondering van golfvorm en morfodynamiek onderling onafhankelijk verondersteld. Onzuiverheden zijn in deze schattingen verwerkt door het kwadraat van de onzuiverheid bij de variantie op te tellen.

Table 5-1 Overzicht van onzekerheidsbronnen in de afvoerverdeling

Onzekerheidsbron	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
Natuurlijke variabiliteit			
wind	17	6	17
golfvorm en morfodynamiek	54/70*)	51*)	28*)
falen kades en overlaten	25	24	24
veranderingen riviergeometrie	27	27	27
Extrapolatie met model			
ruwheid zomerbed	50	46	54
ruwheid uiterwaard	78	48	37
onzekerheid schematisatie	31	37	30
representativiteit calibratiehoogwater	25	25	25
Onzekerheid natuurlijke variabiliteit	81	63	49
-idem- uit afvoermetingen (sectie 3.4)	120-150	35	35
Onzekerheid in extrapolatie met model	101	80	76
Onzekerheid (σ) in de afvoerverdeling bij MHW (afgerond)	130-180	85-100	85-90

*) inclusief onzuiverheid

5.1 Pannerdensche Kop

Op basis van de analyses in hoofdstuk 4 is de onzekerheid in de natuurlijke variabiliteit bij Pannerdensche Kop ongeveer 80 m³/s. Echter op basis van afvoermetingen rond Pannerdensche Kop is in hoofdstuk 3 een ongeveer twee keer zo grote onzekerheid geschat van 120-150 m³/s, afhankelijk van de aanname van de meetfout in de afvoermetingen. Samen met de onzekerheid in de extrapolatie van calibratiehoogwater naar MHW van orde 100 m³/s levert dit een totale onzekerheid in de afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop op van 130-180 m³/s. Volgens de onzekerheidsschaal die in hoofdstuk 2 is gegeven betekent dit dat de onzekerheid in de afvoerverdeling relatief klein is.

5.2 IJsselkop

Dezelfde procedure als hiervoor is beschreven, is gevolgd voor de schatting van de onzekerheid in de afvoerverdeling bij IJsselkop. De analyses uit hoofdstuk 4 gecombineerd met de schatting van de natuurlijke variabiliteit op basis van afvoermetingen leiden tot een totale onzekerheid van 85 tot 100 m³/s. Dit is, hoewel relatief iets groter dan bij Pannerdensch Kop, ook nog aan te merken als een kleine onzekerheid.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van de rapporten en aanvullende analyses worden de volgende conclusies getrokken:

1. De onzekerheid in de afvoerverdeling (σ) bij Pannerdensche Kop bedraagt bij de huidige inrichting van de rivier 130 tot 180 m³/s. De onzekerheid wordt daarmee als relatief klein beoordeeld.
2. De natuurlijke variabiliteit bij Pannerdensche Kop op basis van afvoermetingen rond de Kop bedraagt orde 120 tot 150 m³/s.
3. De onzekerheid in de afvoerverdeling (σ) bij IJsselkop bedraagt bij de huidige inrichting van de rivier 85 tot 100 m³/s. De onzekerheid wordt daarmee als relatief klein beoordeeld.
4. De natuurlijke variabiliteit bij IJsselkop op basis van afvoermetingen bedraagt orde 35 m³/s.
5. De belangrijkste bronnen voor de onzekerheid in de afvoerdeling zijn de morfodynamiek en de hydraulische ruwheid van zomerbed en uiterwaard.
6. Door gebrek aan betrouwbare bodempeilingen rond de hoogwaters van 1993 en 1995 is de kwaliteit van de voorspellingen met het morfologisch model van de bodemontwikkeling en daarmee de afvoerverdeling niet te beoordelen. Dit had voorkomen kunnen worden door de peilingen na de opname direct te valideren.
7. De grootte van de onzekerheid in de hydraulische ruwheid van de uiterwaard is moeilijk te schatten bij gebrek aan betrouwbare metingen tijdens hoogwater. De afvoermetingen die tijdens het hoogwater van 1998 met een ADCP in het zomerbed en in de uiterwaarden rond de splitsingspunten zijn uitgevoerd vertonen een te grote spreiding om geloofwaardig te zijn.

6.2 Aanbevelingen

1. Het is van groot belang om bij hoge Rijnafoeren op uitgebreide schaal afvoermetingen uit te voeren in de uiterwaard voor goed gedefinieerde ecotopen om de aanbevolen waarden voor de ruwheid in het handboek te toetsen.
2. Onderzoek naar het gedrag van beddingvormen tijdens hoge afvoer en de relatie met de hydraulische ruwheid van het zomerbed in combinatie met veldmetingen is zeer gewenst om de onzekerheid in de ruwheidvoorspeller te verkleinen.
3. Directe verwerking en validatie van bodempeilingen is gewenst te voorkomen dat belangrijke en betrouwbare informatie wordt gemist voor de validatie van morfologische berekeningen.
4. Aanbevolen wordt om het effect van bresbreedte op de afvoerdeling van met name het falen van de kade langs het Koningspley nader te onderzoeken.

7 Literatuur

Arnold, E. (2004)

Effectiviteit van een regelaar op de splitsingspunten van de Rijn. Bijsturen van de afvoerverdeling tijdens hoogwater.

Afstudeeronderzoek RIZA/TU Delft

Brilhuis, R. (1988)

Enkele hydraulische en morfologische parameters van de Nederlandse Rijntakken.

DBW/RIZA Nota 88.003, TOW nr.: A.54

Brink, N.G.M. van den, D. Beyer, M.J.M. Scholten en E.H. van Velzen (2005)

Onderbouwing hydraulische randvoorwaarden 2001 voor de Rijn en zijn takken.

Definitief Concept. RIZA

Cappendijk, A.M. en D. Dillingh (1985)

Ontwerpwaarden voor de windsnelheid bij ontwerp van rivierdijken.

COW, S74.040, mei 1985

Chow, V.T. (1959)

Open channel hydraulics.

McGraw-Hill Book Company, Singapore

Duits M.T. en J.M. van Noortwijk (1999)

Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken.

Rapport PR163, HKV Lijn in water

Haskoning (2005)

Afvoerverdeling zomerbed-winterbed. Metingen en WAQUA hoogwater 1998.

Definitief rapport 9P9319.A0

Julien, P.Y. and G.J. Klaassen (1995)

Sand-dune geometry of large rivers during floods.

Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol: 21, No. 9.

Ogink H.J.M. (2003)

Nauwkeurigheid toetspeilen.

Notitie. WL|Delft Hydraulics, November 2003

Oosting, D.H. (2001)

Een zekere onzekerheid?: een onderzoek naar de invloed van onzekerheden in ruwheid op de overschrijdingskansen van de maatgevende hoogwaterstanden op de Rijntakken en de mogelijkheden om met noodoverlooptgebieden deze onzekerheden te ondervangen.

RWS/RIZA, RIZA werkdocument 2001.082X.

Rijn, L.C. van (1984)

Sediment transport, Part III: Alluvial Roughness.

Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol: 110, No. 12.

Schropp, M.H.I. (2002)

Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater.
RWS/RIZA, RIZA rapport 2002.047

Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops (2002)
Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden
Deel 1 Handboek versie 1.0
RIZA werkdokument: 2002.140x

Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops (2002)
Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden
Deel 2 Achtergrondsdokument versie 1.0
RIZA werkdokument: 2002.141x

Velzen E.H. van (2003)
Nauwkeurigheid
Notitie, RIZA

Velzen, E.H. van, en C. Stolker, (2006)
Verschilanalyse toetspeilen HR2001-HR2006, Bovenrivieren, Rintakken.
RIZA, Werkdocument, maart 2006

Velzen E.H. van (2006)
Afleiding onzekerheid in waterstand bovenrivierengebied van Rijn en Maas.
RIZA, Memo WRR 2005-034

Verheij, H.J. (2002)
Modification breach growth model in HIS-OM.
WL | Delft Hydraulics, Q3299, November 2002

Vuuren W.E. van (2003)
Een analyse van de spreiding in de opgetreden piekwaterstanden tijdens historische hoogwaters op de Rijntakken over de periode 1901-2001
RIZA memo WSR 2001-004

Vuuren, W.E. van (2003).
Een analyse van de spreiding in opgetreden piekwaterstanden tijdens de historische hoogwaters op de Rijntakken over de periode 1901-2001.
RIZA memo: WSR 2003-011

Vuuren, W.E. van (2005)
Met balen vol sigma's de Rijn en Maas afzakken.
Werkdocument 2005.145X, RIZA

Variantie van afvoerfractie en onzekerheid in afvoerdeling

De afvoerfractie naar de Waal kan worden geschreven als:

$$F = \frac{Q_W + \Delta Q}{(Q_W + \Delta Q) + (Q_{PK} - \Delta Q)} = \frac{Q_W + \Delta Q}{Q_W + Q_{PK}} \quad (\text{A.1})$$

waarin: Q_W = afvoer naar de Waal met meetfout, exclusief afvoerverandering

Q_{PK} = afvoer naar PK met meetfout, exclusief afvoerverandering

ΔQ = afvoerverandering over splitsingspunt met $E[\Delta Q] = 0$

De variantie van F als functie van de stochastische variabelen Q_W , Q_{PK} , en ΔQ wordt:

$$\sigma_F^2 = Var\left(\frac{Q_W}{Q_W + Q_{PK}}\right) + Var\left(\frac{\Delta Q}{Q_W + Q_{PK}}\right) \quad (\text{A.2})$$

Omdat de meetfouten in Q_W en Q_{PK} onafhankelijk zijn kan de eerste term rechts met een Taylor reeks benadering geschreven worden als:

$$\begin{aligned} Var\left(\frac{Q_W}{Q_W + Q_{PK}}\right) &\approx \left(\frac{\partial g}{\partial Q_W}\right)^2 \sigma_{Q_W}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial Q_{PK}}\right)^2 \sigma_{Q_{PK}}^2 \quad \text{met} \quad g = \frac{Q_W}{Q_W + Q_{PK}} \\ \frac{\partial g}{\partial Q_W} &= \frac{1}{Q_W + Q_{PK}} - \frac{Q_W}{(Q_W + Q_{PK})^2} = \frac{Q_{PK}}{(Q_W + Q_{PK})^2} \\ \frac{\partial g}{\partial Q_{PK}} &= -\frac{Q_W}{(Q_W + Q_{PK})^2} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Voer in:

$$\begin{aligned} Q_R &= Q_W + Q_{PK} \\ Q_W &= \alpha Q_R \\ Q_{PK} &= (1 - \alpha) Q_R \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Omdat de relatieve meetfouten in de afvoer ongeveer gelijk zijn geldt ook:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{Q_W}}{Q_W} &= \frac{\sigma_{Q_{PK}}}{Q_{PK}} = \frac{\sigma_{Q_R}}{Q_R} \\ \sigma_{Q_W}^2 &= \left(\frac{Q_W}{Q_R}\right)^2 \sigma_R^2 = \alpha^2 \sigma_R^2 \\ \sigma_{Q_{PK}}^2 &= \left(\frac{Q_{PK}}{Q_R}\right)^2 \sigma_R^2 = (1 - \alpha)^2 \sigma_R^2 \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Substitutie van (A.4) en (A.5) in (A.3) geeft:

$$Var\left(\frac{Q_W}{Q_W + Q_{PK}}\right) \approx (1 - \alpha)^2 \alpha^2 \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \alpha^2 (1 - \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 = 2\alpha^2 (1 - \alpha)^2 \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 \quad (\text{A.6})$$

Voor de tweede term in het rechterlid van (A.2) kan eenzelfde procedure worden gevolgd, maar omdat $\Delta Q \ll Q_W + Q_{PK} = Q_R$ geldt bij benadering:

$$Var\left(\frac{\Delta Q}{Q_W + Q_{PK}}\right) \approx \left(\frac{\sigma_{\Delta Q}}{R}\right)^2 \quad (A.7)$$

Substitutie van (A.6) en (A.7) in (A.2) geeft:

$$\sigma_F^2 = 2\alpha^2(1-\alpha)^2 \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta Q}}{R}\right)^2 \quad (A.8)$$

Uit (A.8) volgt tenslotte voor de onzekerheid in de afvoerdeling met $R = Q_{Totaal}$ en de relatieve fout in de afvoerdeling $\sigma_R/R = \beta$ om de betrekking algemeen toepasbaar te maken voor splitsingspunten:

$$\sigma_{\Delta Q} = Q_{Totaal} \sqrt{\sigma_F^2 - 2\alpha^2(1-\alpha)^2\beta^2} \leq \sigma_F Q_{Totaal} \quad (A.9)$$

waarin: $\sigma_{\Delta Q}$ = onzekerheid in afvoerdeling

Q_{Totaal} = bovenaanvoer op splitsingspunt

σ_F = standaardafwijking in afvoerfractie

α = gemiddelde van afvoerfractie naar een tak

β = relatieve afvoermeetfout

De laatste bovengrens is van toepassing wanneer de afvoermetingen zonder meetfouten worden uitgevoerd. De standaardafwijking in de afvoerfractie vermenigvuldigd met het aanvoerdebiet geeft dus de maximale waarde voor de onzekerheid in de afvoerdeling.