



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

RIZA Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling

Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater

RIZA rapport 2002.047

Dit rapport is te bestellen à € 11 per stuk bij Cabri Mailservice, Postbus 431, 8200 AK Lelystad,
Tel. 0320-285333, Fax. 0320-285311, E-mail riza@cabri.nl
Betaling na levering; een acceptgiro wordt bijgevoegd.
Het rapport is gratis voor dienstonderdelen van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

This publication can be ordered at € 11 per copy through Cabri Mailservice, PO Box 431,
8200 AK Lelystad, The Netherlands, Tel. +31 320 285333, Fax, +31 320 285311, E-mail riza@cabri.nl
Payment on delivery.



Onzekerheden in de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater

RIZA rapport 2002.047
ISBN 9036954762
Auteur: ir. M.H.I. Schropp

RIZA
Arnhem, september 2002

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Probleemstelling	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Methode	7
2 Literatuuronderzoek splitsingspunten	9
2.1 Werken aan de splitsingspunten	9
2.2 Onderzoek naar de afvoerverdeling	11
3 Onzekerheidsbronnen en hun effecten	13
3.1 Windinvloed	13
3.2 Zijdelingse toestroming	18
3.3 Golfvorm	20
3.4 Morfodynamiek tijdens MHW	22
3.5 Retentiegebieden	28
3.6 Falen van kades en overlaten	31
3.7 Veranderingen in de riviergeometrie	33
3.8 Hydraulische ruwheid	34
3.9 Gebruikte modelparameters	38
3.10 Synthese	39
4 Conclusies en aanbevelingen	41
4.1 Conclusies	41
4.2 Aanbevelingen	41
Referenties	43
Bijlagen	47
1 Vereffeningsfactoren afvoerverdeling	49
2 Literatuuroverzicht splitsingspuntenonderzoek	53

Lijst met figuren

Figuur 1	Het splitsingspunt bij Schenkenschans in 1685, stroomopwaarts gezien.	9
Figuur 2	Het splitsingspunt van Waal en Nederrijn in 1699.....	10
Figuur 3	Het splitsingspuntengebied in 1784.	11
Figuur 4	Vergelijking windeffect van Sobek en WAQUA bij MHW.	14
Figuur 5	Effect van wind op de afvoerverdeling en waterstand.....	15
Figuur 6	Kansen op windrichting voor Schiphol per sector van 30°.	16
Figuur 7	Waalafvoer en wind.	16
Figuur 8	Dynamisch effect van wind.	17
Figuur 9	Effect op de afvoerverdeling van zijdelingse toestroming.	19
Figuur 10	Zijdelingse toevoer bij MHW.....	20
Figuur 11	MHW-golven bij Lobith en hun onderschrijdingskansen.	21
Figuur 12	Effect van de golfvorm op de afvoerverdeling.	22
Figuur 13	Effect van de golfvorm op de waterstanden.....	22
Figuur 14	Effect van golfvorm en morfologie op de afvoerverdeling.	23
Figuur 15	Effect van golfvorm en morfologie op de waterstanden.....	23
Figuur 16	Effect op de afvoerverdeling IJsselkop.....	24
Figuur 17	Bodemontwikkeling bovenloop takken tijdens MHW.....	25
Figuur 18	Lengteprofiel MHW-verschillen als gevolg van morfodynamiek.	26
Figuur 19	Bodemligging Pannerdens Kanaal bij hoogwater 1926.	28
Figuur 20	Kruinhoogte en -breedte.	29
Figuur 21	De Pannerdense overlaat na het hoogwater van februari 1970.	32
Figuur 22	Overschrijdingskansen afvoer bij onzekerheid in de zomerbedruwheid.....	36
Figuur 23	Zomerbedruwheid en afvoerverdeling.....	37

Lijst met tabellen

Tabel 1	Modelparameters wind in Sobek en WAQUA.	13
Tabel 2	Omschrijving Beaufortschaal.....	15
Tabel 3	Parameters verstoring afvoerverdeling door zijdelingse toestroming.	18
Tabel 4	Effect zijdelingse toestroming op afvoerverdeling.	20
Tabel 5	Verandering in trajectgemiddelde bodemligging.....	24
Tabel 6	Evenwichtsafvoer en maatgevende afvoer in 1963.	27
Tabel 7	Beschrijving van twee overlaatvarianten.	30
Tabel 8	Verandering afvoer Pannerdens Kanaal bij retentiegebied op Waalkm 874.....	31
Tabel 9	Afvoereffect bij MHW van falen van kades en overlaten.	33
Tabel 10	Effect van de zomerbedbodem op de afvoerverdeling tussen 1993 en 1997.	34
Tabel 11	Effect van 0,10 m daling van de hoogte van het zomerbed.	34
Tabel 12	WAQUA-berekeningen met aangepaste ruwheid.....	35
Tabel 13	Effect van + of - 50% verandering in k-waarde uiterwaard.	38
Tabel 14	Afvoereffect van de overlaatcoëfficiënt.	38
Tabel 15	Samenvatting afvoereffecten.	39
Tabel 16	Vereffening van afvoer en waterstand.	49

Samenvatting

De afvoerverdeling over de Rijntakken tijdens Maatgevend Hoogwater (MHW) kan afwijken van wat met modellen wordt berekend. Het overstromingsrisico neemt hierdoor toe, omdat langs de tak die meer water ontvangt de waterstanden hoger worden. De Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat heeft het RIZA gevraagd een onderzoek uit te voeren waarin de onzekerheden in de afvoerverdeling tijdens MHW kwantitatief worden verkend. Waar mogelijk is gebruik gemaakt van kansverdelingen, maar omdat die informatie niet altijd beschikbaar was, is geen volledig probabilistische aanpak gevolgd.

Als eerste is een literatuurstudie uitgevoerd naar wat anderen hebben geschreven over onzekerheden in de afvoerverdeling over de Rijntakken bij MHW. Daaruit blijkt dat, hoewel er veel is geschreven over werken die zijn uitgevoerd aan de splitsingspunten, er weinig literatuur is over onzekerheden in de afvoerverdeling. Vermeldenswaard is dat in de jaren 60 per riviertak een afvoertoeslag werd opgeteld bij de met modellen berekende afvoerverdeling, om tegemoet te komen aan onzekerheden in de afvoerverdeling. In recent onderzoek worden enkele belangrijke parameters (bodempligging, hydraulische ruwheid, ...) als stochasten beschouwd, en wordt met een Monte Carlosimulatie onder meer de onderschrijdingskans van de afvoerverdeling berekend.

Na de literatuurstudie is met modelonderzoek de onzekerheid in de afvoerverdeling gekwantificeerd. Van de volgende onzekerheidsbronnen is het effect bepaald:

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

De uitwerking hiervan tot een onzekerheid in de afvoerverdeling verschilt per bron. Waar mogelijk is van de betreffende parameter (windrichting, breedte van de MHW-golf, overlaatdimensies, ...) een groot domein doorgerekend, teneinde het bereik te verkennen. In andere gevallen (riviergeometrie, modelparameters, ...) was deze aanpak te omslachtig of niet nodig, en is door middel van een enkele berekening het effect op de afvoerverdeling geschat. Uit het onderzoek blijkt dat alle bovenstaande onzekerheidsbronnen een individueel effect hebben van enkele tientallen m^3/s , met uitzondering van zijdelingse toestroming waarvan het effect te verwaarlozen is, en van de hydraulische ruwheid en morfodynamiek tijdens MHW waar het effect in de

orde van $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ligt. Een 'worst case'-benadering levert een cumulatieve toename van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ voor Waal, Nederrijn en IJssel, en $600 \text{ m}^3/\text{s}$ voor het Pannerdens Kanaal. Realistische schattingen voor de onzekerheid in de afvoerverdeling zijn waarden van resp. 200 en $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Uiteraard neemt bij een afvoertoe name op één tak de afvoer op één of meer andere takken af, maar dit heeft geen negatieve gevolgen voor de veiligheid tegen overstromen.

Een betere schatting van de onzekerheid in de afvoerverdeling kan worden verkregen met een volledige probabilistische benadering van de onzekerheidsbronnen. De onzekerheid in de afvoerverdeling kan worden geneutraliseerd door tijdens MHW op de splitsingspunten de afvoerverdeling actief bij te sturen. Daarom wordt aanbevolen een verkenning uit te voeren naar de mogelijkheden van het operationeel regelen van de afvoerverdeling.

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

De Maatgevende Hoogwaterstanden (MHW) op de Rijntakken zijn zeer gevoelig voor de afvoerverdeling over de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop. Een relatief geringe wijziging in de afvoerverdeling over de Pannerdense Kop van 1% ($160 \text{ m}^3/\text{s}$) heeft over alle Rijntakken waterstandsveranderingen tot gevolg in de orde van 6 cm. Wanneer bedacht wordt dat in de PKB 'Ruimte voor de Rivier' de taakstelling voor het bovenrivierengebied in de orde van 30 cm ligt, dan is een verstoring van de afvoerverdeling van deze grootte niet te verwaarlozen. Behalve bij de PKB 'Ruimte voor de Rivier' komt het aspect onzekerheden in de afvoerverdeling ook terug in de Spankrachtstudie (kan het riviersysteem $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ aan?), en bij de discussie over noodoverloopgebieden (Commissie Luteyn). Gezien het grote belang voor de veiligheid tegen overstromen wil de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat graag meer inzicht in welke mate de werkelijke afvoerverdeling over de Rijntakken tijdens MHW kan afwijken van de vooraf met modellen berekende afvoerverdeling.

1.2 Doelstelling

RWS / Directie Oost-Nederland (drs. F.T.G. Tank) heeft het RIZA gevraagd een onderzoek uit te voeren naar de onzekerheidsbronnen in de afvoerverdeling bij MHW. Het doel is om vast te stellen hoe groot de marges zijn waarbinnen de werkelijke afvoerverdeling tijdens MHW door verschillende factoren kan afwijken van de berekende waarde, en het vaststellen van het relatieve belang van de factoren.

1.3 Methode

Als eerste is een literatuurstudie uitgevoerd om na te gaan wat er op dit gebied reeds gedaan is. Daarna is van de volgende aspecten de invloed op de afvoerverdeling onderzocht:

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

Een aantal van bovenstaande onzekerheidsbronnen zijn zelf stochasten, en waar mogelijk zijn daarvan de kansen gekwantificeerd. Dit is echter geen

volledig probabilistisch onderzoek waarin de kansverdeling van de afwijking in de afvoerverdeling wordt berekend.

Waar mogelijk en wenselijk zijn de effecten bepaald met dynamische berekeningen en het volledige WAQUA-Rijntakkenmodel (WAQUA-versie 2002.02 met verbeterde overlaatroutine, Rijntakkenmodel MHW98_2). Sommige aspecten, zoals het effect van de golfvorm, lenen zich echter niet voor het doorrekenen met WAQUA, en daarvoor is het Sobek Rijntakkenmodel (lit. 14, 36) ingezet. De analyse is uitgevoerd voor een MHW-afvoer van 16.000 m³/s, waarbij niet is ingegaan op onzekerheden in de grootte van de MHW-topafvoer zelf.

2 Literatuuronderzoek splitsingspunten

2.1 Werken aan de splitsingspunten

De eerste gedocumenteerde bemoeienis met de afvoerdeling van de Rijn dateert van het begin van onze jaartelling met de aanleg van de Drususgracht. Waar deze gracht precies heeft gelegen is niet bekend, maar de IJssel tussen Westervoort en Doesburg wordt op oude kaarten wel aangeduid als de 'Fossa Drusiana'. Veldheer Drusus zou bij het splitsingspunt van Rijn en Waal (bij Schenkenschans of wellicht nog verder stroomopwaarts) een krib hebben laten aanleggen om meer water naar de Nederrijn te krijgen, en een dijk aan de linkeroever van de Nederrijn om te voorkomen dat het water alsnog via de Waal wegstroomde. Dit met als doel de IJssel van meer water te voorzien om zo het transport van troepen naar het noorden te vergemakkelijken, en om een verdedigingslinie te hebben tegen vijandelijke Germanen uit het oosten (lit. 21, 22, 27).

Figuur 1 Het splitsingspunt bij Schenkenschans in 1685, stroomopwaarts gezien. In het midden de Boterdijk, de scheidingsdam tussen Waal en Nederrijn, doorgebroken in 1711.



Beheersing en beïnvloeding van de afvoerdeling om militaire redenen is een terugkerend thema. Door het ontbreken van voldoende politieke eenheid was beïnvloeding, laat staan beheersing van de afvoerdeling tot aan de 17^e eeuw niet mogelijk. Om de afvoer naar de Nederrijn te vergroten werden tussen 1615 en 1628 op het splitsingspunt bij Schenkenschans een schephoofd¹, en aan de linkeroever een aantal leikribben² aangelegd. Deze werken hadden echter een averechts effect, omdat de rechteroever inschaarde³ en de monding van de Nederrijn steeds meer in een binnenbocht kwam te liggen. Ook bij de IJsselmond werden in die periode een schephoofd en een leikrib gelegd ter vergroting van de IJsselafvoer, echter eveneens zonder het

¹ Stroomopwaartse verlenging van het splitsingspunt met als de doel de mond van de Waal te versmallen en die van de Nederrijn te verbreden.

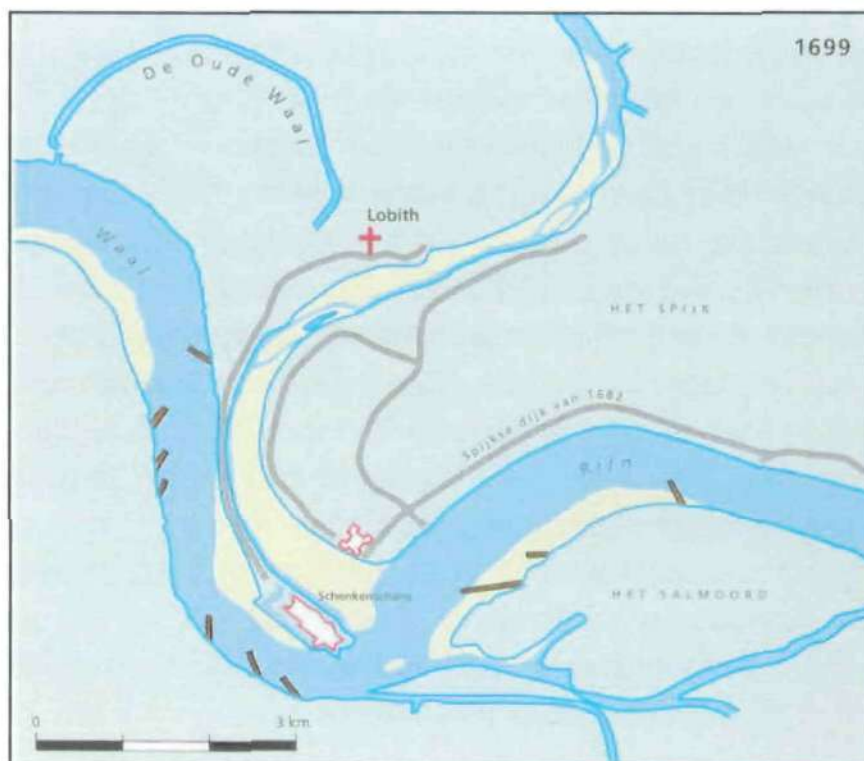
² Kribben met als doel de stroom te geleiden richting de mond van de Nederrijn.

³ Het zich terugtrekken van de oever als gevolg van de eroderende werking van de rivier.

gewenste effect. De IJsselmond verplaatste zich steeds verder stroomopwaarts en werd daarbij steeds smaller.

In 1697 trok de Nederrijn nog maar 1/24 van de afvoer (Figuur 2). Om meer water naar Nederrijn en IJssel te krijgen werd in 1707 in opdracht van het 'College tot Beneficering van Nederrijn en IJssel' het Pannerdens Kanaal aangelegd, een vergraving van een bestaande verdedigingsgracht tussen de Waal en de Nederrijn bij Kandia. Omdat het Pannerdens Kanaal zonder winterbed was aangelegd, stelde zich bij hoogwater een steil verhang in. Hierdoor schuurde de rivierbodem uit (tot 5 meter in 1745), en ontwikkelde het kanaal zich al snel tot een volwaardige rivierarm. Nu kwam het voor dat de Nederrijn juist teveel water kreeg, zeker nadat in 1711 de Boterdijk was doorgebroken, de smalle scheidingsdam tussen Waal en Nederrijn benedenstrooms van Schenkenschans (zie Figuur 1). Hierdoor schuurde ook de oude monding van de Nederrijn bij Schenkenschans weer open. Doorbraken van de Spijkse Dijk vergrootten de Nederrijnafvoer nog verder.

Figuur 2 Het splitsingspunt van Waal en Nederrijn in 1699.



In 1745 werd tussen de provincies Gelderland, Utrecht en Holland de verdeling 2/3 Waal, 2/9 Nederrijn en 1/9 IJssel, die toen verondersteld werd te bestaan (lit. 18), bij conventie vastgelegd⁴. De conventie leidde tot maatregelen tegen verdere verruiming van het Pannerdens Kanaal, maar niet tegen die van de oude Rijnmond bij Spijk. Pas bij conventie van 1771 tussen de koning van Pruisen en de Staten van Gelderland en Holland en West-Friesland werd besloten tot het beteugelen van de mond van de oude Rijn, waardoor deze alleen bij hoge rivierstand water afvoerde (1780), het leggen van een

⁴ Artikel 8 van de conventie luidde: "Dat gelijk gerekent word, dat jegenwoordig omtrent, twee derde parten van 't water van den Boven-Rhijn langs de Waal, en een derde part langs den Neder-Rhijn, Leck en IJssel worde afgeleid, het best altoos sal zijn, die proportie te doen stand grijpen, en voor zooveel doenlijk te conserveren".

inlaagdijk⁵ op de rechteroever van de Waalbocht van de Bijland (1772), de Pleij te doorgraven zodat de IJssel 1/3 van het Nederrijnwater kreeg (1775), en de inscharende Waalbocht die in 1764 Herwen van de kaart had geveegd af te snijden met een doorgraving van de Bijlandsche Waard (1775). Eind 18^e eeuw kwam zo in grote lijnen de inrichting van het splitsingspuntengebied tot stand zoals we die nu kennen, zie Figuur 3.

Figuur 3 Het splitsingspuntengebied in 1784.



Vanaf 1780 werd de oude Rijnmond stapsgewijs veranderd in de Spijkse (of Lobithse) overlaat. De overlaat had zeer te lijden van uitschuring, en werd bij herstel vaak verhoogd en versmald in afwijking van de bij conventie van 1771 toegestane maten. Tot 1923 werkte de overlaat bijna elk jaar, maar in dat jaar werd de overlaat verhoogd tot 15 m boven Amsterdams Peil. In 1959 werd de Spijkse overlaat geheel gesloten, en in 1970 volgde de afsluiting van de benedenmond van de Oude Rijn bij Kandia. Als compensatie voor het sluiten van de Spijkse overlaat werd eind jaren 50 langs de bovenloop van het Pannerdens Kanaal een groene rivier aangelegd, met een overlaat in de verlaagde voormalige banddijk. Omdat men verdere uitschuring van het Pannerdens Kanaal en een instabiele afvoerverdeling vreesde, werden ook plannen gemaakt om de bovenloop van de Waal verder te verruimen. Uiteindelijk zijn alleen een aantal kaden nabij het splitsingspunt Pannerdense Kop versterkt (lit. 22).

2.2 Onderzoek naar de afvoerverdeling

Het systematisch onderzoek aan de splitsingspunten begint in 1671, wanneer Johannes Hudde en Christiaan Huygens de opdracht krijgen de toestand van Bovenrijn, Nederrijn en IJssel te onderzoeken. Zij voerden vervalmetingen uit en deden onder meer de aanbeveling te streven naar minimale rivierbreedten en om de IJssel te kanaliseren (lit. 22, 37).

In de 19^e eeuw worden voldoende afvoermetingen uitgevoerd om de afvoerverdeling, en de veranderingen daarin te kwantificeren (lit. 18). Het inzicht ontstaat dat de verdeling niet een constante verhouding is, maar afhangt van het afvoerniveau. Bij een riviersplitsing voert de grootste riviertak bij lage waterstanden relatief meer af, bij hoge waterstanden kruipen de verhoudingen naar elkaar toe. Over de periode 1861-1906 blijkt het aandeel van de Waalafvoer af te nemen. Bij de IJsselkop is er geen trend in de

⁵ Een tweede dijk binnendijs van de bestaande dijk, wanneer verwacht wordt dat de bestaande dijk zal worden ondermijnd door een inscharende oever.

afvoerverdeling te ontdekken. Wel valt op dat de Nederrijn alleen bij zeer hoge afvoeren het beoogde aandeel van 2/9 haalt, en dat de IJssel bij hoge afvoeren veel meer en bij lage afvoeren veel minder dan 1/9 deel krijgt.

In de jaren 1950-1970 stond de afvoerverdeling over de Rijntakken sterk in de belangstelling van Rijkswaterstaat. Dit heeft alles te maken met de grote rivierwerken die toen uitgevoerd werden: de kanalisatie van de Nederrijn, de bochtafsnijdingen in de IJssel, het sluiten van de Spijkse overlaat en de Oude Rijn bij Kandia, en de aanleg van een groene rivier langs het Pannerdens Kanaal. Dit resulteerde in een groot aantal onderzoeksrapporten, en in bijlage 2 is van een aantal titels in chronologische volgorde een samenvatting opgenomen. Naast fundamenteel onderzoek gaan veel studies over het verruimen van het Pannerdens Kanaal en/of van de bovenloop van de Waal, en over de morfologische effecten op de IJssel van bochtafsnijdingen en Rijnkanalisatie. Als gevolg van de toegenomen MHW-afvoer en het zoeken naar maatregelen om hiermee om te gaan, herleeft de laatste jaren de aandacht voor de afvoerverdeling. Ook van dit onderzoek is in bijlage 2 van een aantal titels een samenvatting opgenomen.

Het geheel overziende kan geconcludeerd worden dat in het verleden veel onderzoek is verricht naar de gewenste afvoerverdeling over de Rijntakken en hoe deze te realiseren, maar dat weinig aandacht is besteed aan de onzekerheden die daarbij in het geding zijn. In het volgende hoofdstuk zal worden getracht in die leemte te voorzien. Waar van toepassing zal dan ook het onderzoek naar onzekerheden in de afvoerverdeling dat wel is verricht, worden besproken.

3 Onzekerheidsbronnen en hun effecten

3.1 Windinvloed

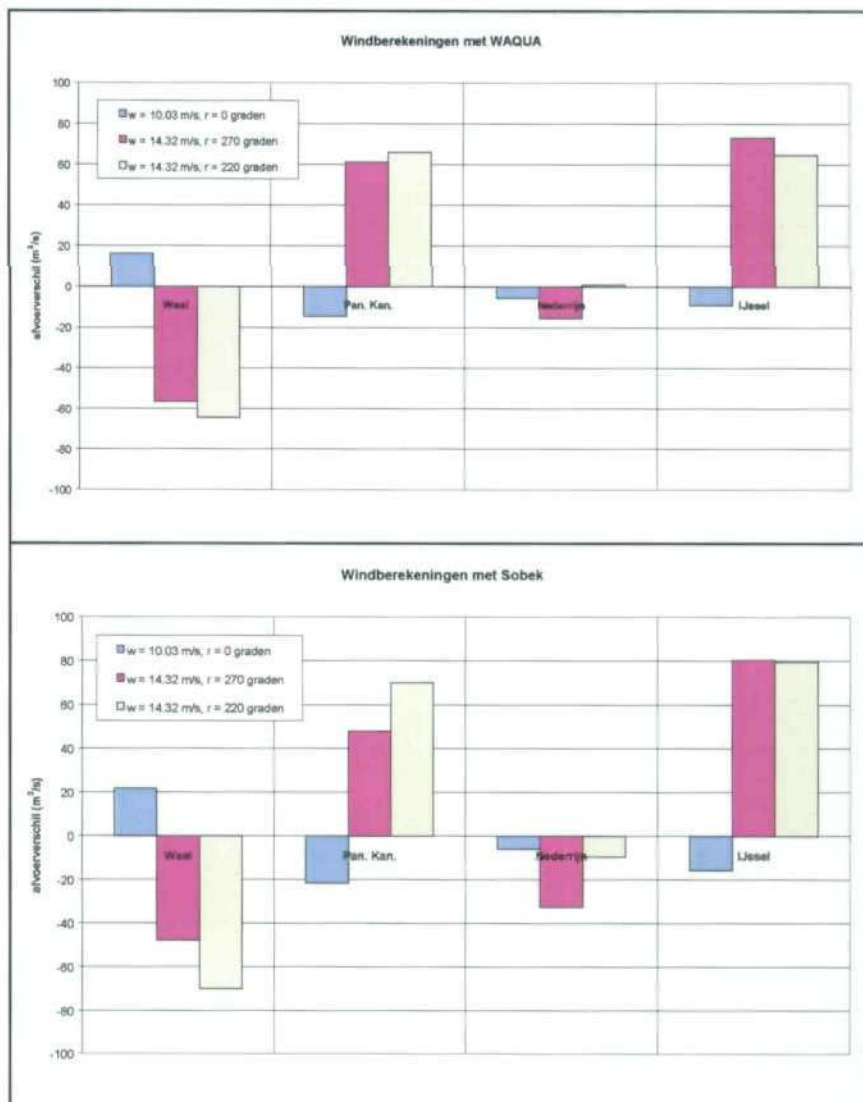
Bij het berekenen van de MHW-standen wordt geen rekening gehouden met de invloed van wind op de waterstanden of de afvoerverdeling. De Leidraad Bovenrivieren (lit. 33) stelt dat opwaaiing in de regel slechts enkele centimeters tot maximaal een decimeter bedraagt, en daarom niet apart in rekening hoeft te worden gebracht. Het effect van opwaaiing wordt geacht voldoende te zijn gecompenseerd in de minimumwaakhoogte van 0,50 m. De windinvloed komt wel expliciet terug bij het dijkontwerp, en wel bij de golfloop tegen het buitentalud en golfoverslag over de kruin. Deze windinvloed wordt eveneens verdisconteerd in de waakhoogte van de dijk.

Tabel 1 Modelparameters wind in Sobek en WAQUA.

parameter	omschrijving	waarde	eenheid
ρ_l	dichtheid van lucht	1,205	kg/m ³
γ	beschuttingsfactor	1,0	-
α_1	constante in de windconversiecoëfficiënt	9,10 e-4	-
α_2	factor in de windconversiecoëfficiënt	6,10 e-5	s/m

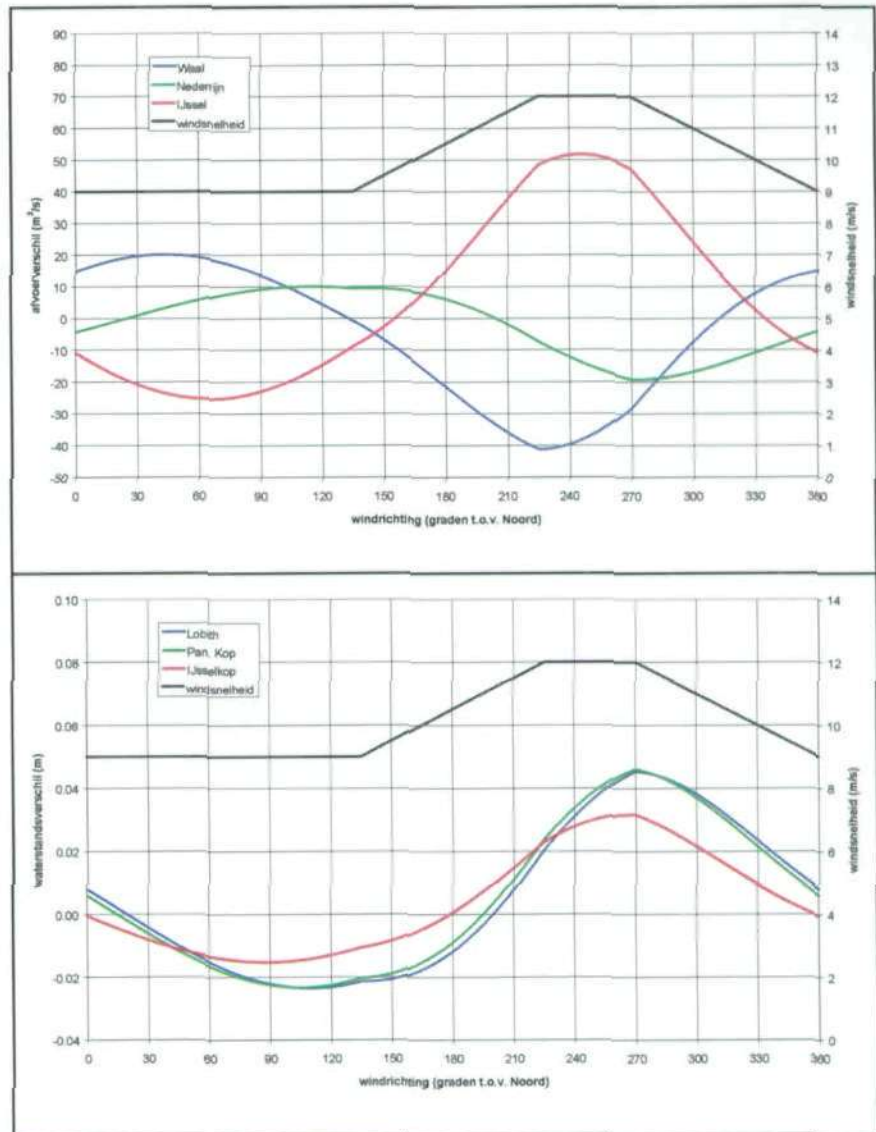
In deze paragraaf wordt de windinvloed op de afvoerverdeling bij MHW gekwantificeerd. In de Leidraad Bovenrivieren is een grafiek gegeven van de windsnelheid tijdens MHW als functie van de windrichting voor meteostation Deelen. Volgens de Leidraad zijn de kans op MHW en de kans op wind statistisch onafhankelijk. Hoewel bedoeld voor het berekenen van golfloop en golfoverslag, kunnen de waarden van de Leidraad ook gebruikt worden voor het effect op de afvoerverdeling. Berekeningen met WAQUA zijn het meest nauwkeurig, maar erg omslachtig. Daarom zijn de windberekeningen uitgevoerd met Sobek, waarbij de resultaten steekproefsgewijs zijn gecontroleerd met WAQUA. Ook voor de vergelijking tussen Sobek en WAQUA zijn de waarden voor de windsnelheid en windrichting ontleend aan de Leidraad. Er is echter niet gewerkt met afgeronde waarden voor de windsnelheid, omdat gebruik is gemaakt van bestaande WAQUA-berekeningen uit lit. 17. De windrichting wordt met de klok mee in graden opgegeven ten opzichte van het noorden. Noordenwind is 0°, oostenwind is 90°, etc. Naast de windsnelheid en de windrichting moeten ook enkele modelparameters worden opgegeven die de wind omrekenen in een schuifspanning op het wateroppervlak. In beide modellen zijn hiervoor de waarden uit Tabel 1 aangehouden. De grootste onzekerheid zit in de beschuttingsfactor, maar omdat het effect op de afvoerverdeling en waterstand lineair is met deze factor, zijn de resultaten eenvoudig om te rekenen als bij nader inzien een andere factor gewenst is. In WAQUA zijn de windparameters alleen modelbreed op te geven, en daarom zijn ook in Sobek voor alle takken dezelfde waarden gebruikt. Alle berekeningen zijn uitgevoerd met een stationair windveld waarbij de windrichting kan variëren, en een stationaire afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith.

Figuur 4 Vergelijking windeffect van Sobek en WAQUA bij MHW. De verandering in de afvoerdeling bij drie windsnelheden uit verschillende richtingen.



Uit de vergelijking tussen Sobek en WAQUA (Figuur 4) blijkt dat beide modellen nagenoeg hetzelfde effect op de afvoerdeling berekenen, en dat Sobek dus voldoende nauwkeurig is voor het uitvoeren van windberekeningen. Vervolgens zijn met Sobek alle windrichtingen doorgerekend met de bijbehorende windsnelheid, zie Figuur 5. In de figuur is tevens de windsnelheid volgens de Leidraad uitgezet (zwarte lijn, rechter y-as). De verschillen in de afvoerdeling bedragen maximaal enkele tientallen m^3/s , het effect op de waterstand is enkele cm. Bij het effect op de waterstand dient wel bedacht te worden dat hier twee effecten door elkaar lopen. De wijziging in afvoerdeling heeft een effect op de waterstand, maar de opwaaiing is ook een rechtstreeks effect van de wind op de waterstand. Afhankelijk van de windrichting versterken deze effecten elkaar, of werken ze elkaar tegen. In Figuur 5 is het netto effect van beide invloeden te zien. Wanneer men de afvoerdeling bij MHW met operationele sturing zou corrigeren, dan zijn vanwege de opwaaiing de waterstanden daarmee nog niet terug op het referentieniveau.

Figuur 5 Effect van wind op de afvoerverdeling en waterstand. Windsnelheid als functie van de windrichting (zwarte lijn) ontleend aan de Leidraad Bovenrivieren.



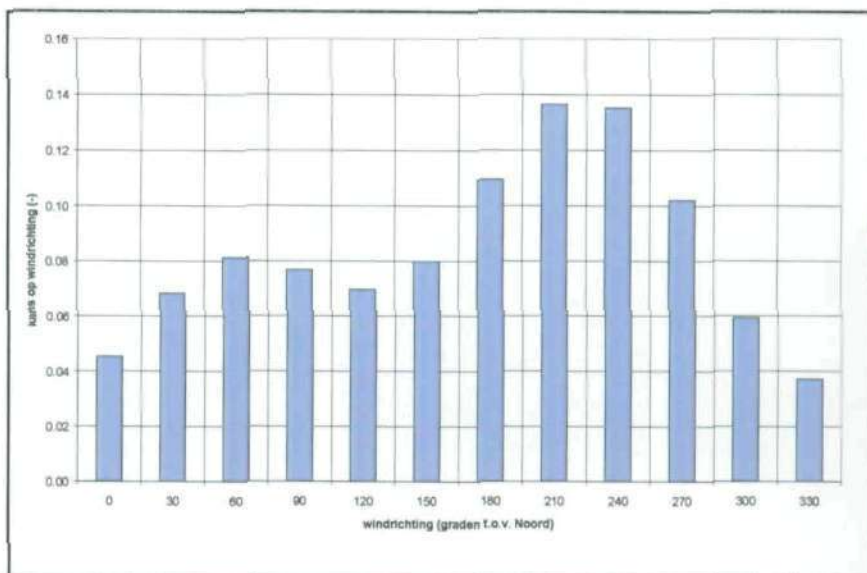
Tabel 2 Omschrijving Beaufortschaal.

schaal	benaming	windsnelheid (m/s)
0	Stil	0,0 – 0,2
1	Zwakke wind	0,3 – 1,5
2	Zwakke wind	1,6 – 3,3
3	matige wind	3,4 – 5,4
4	matige wind	5,5 – 7,9
5	vrij krachtige wind	8,0 – 10,7
6	krachtige wind	10,8 – 13,8
7	harde wind	13,9 – 17,1
8	stormachtige wind	17,2 – 20,7
9	Storm	20,8 – 24,4
10	zware storm	24,5 – 28,4
11	zeer zware storm	28,5 – 32,6
12	orkaan	> 32,6

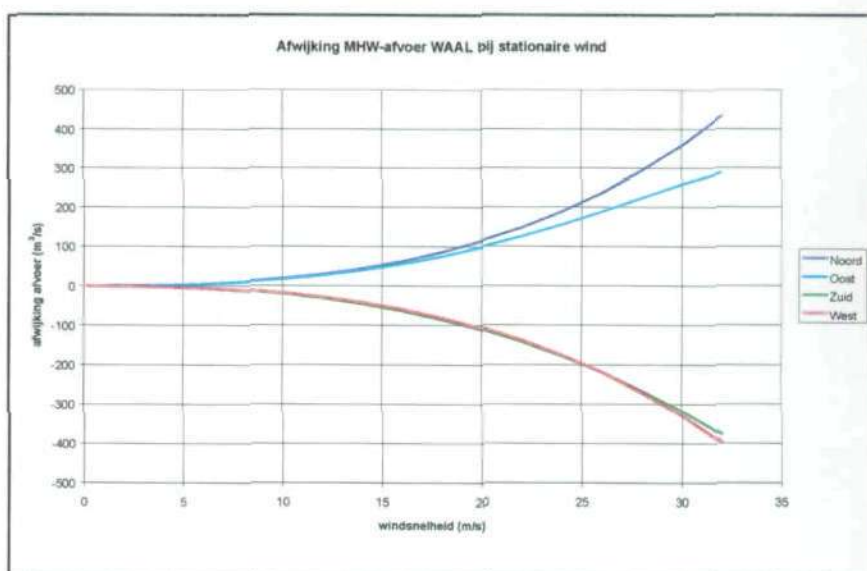
Omdat in de praktijk veel gewerkt wordt met de Beaufortschaal, is in Tabel 2 de omrekening gegeven van Beaufort naar windsnelheid.

Het grootste effect treedt op bij richtingen tussen zuid en west, en deze richtingen hebben ook de grootste kans van voorkomen. In lit. 31 wordt een tabel gegeven met voor het winterhalfjaar de kansverdeling van de windrichting per dag per sector van 30°. Hoewel de verdeling is afgeleid voor de locatie Schiphol, geeft het toch een indruk van de kansverdeling van de windrichting in Oost-Nederland. De kansverdeling van de windrichting is uitgezet in Figuur 6.

Figuur 6 Kansen op windrichting voor Schiphol per sector van 30°.



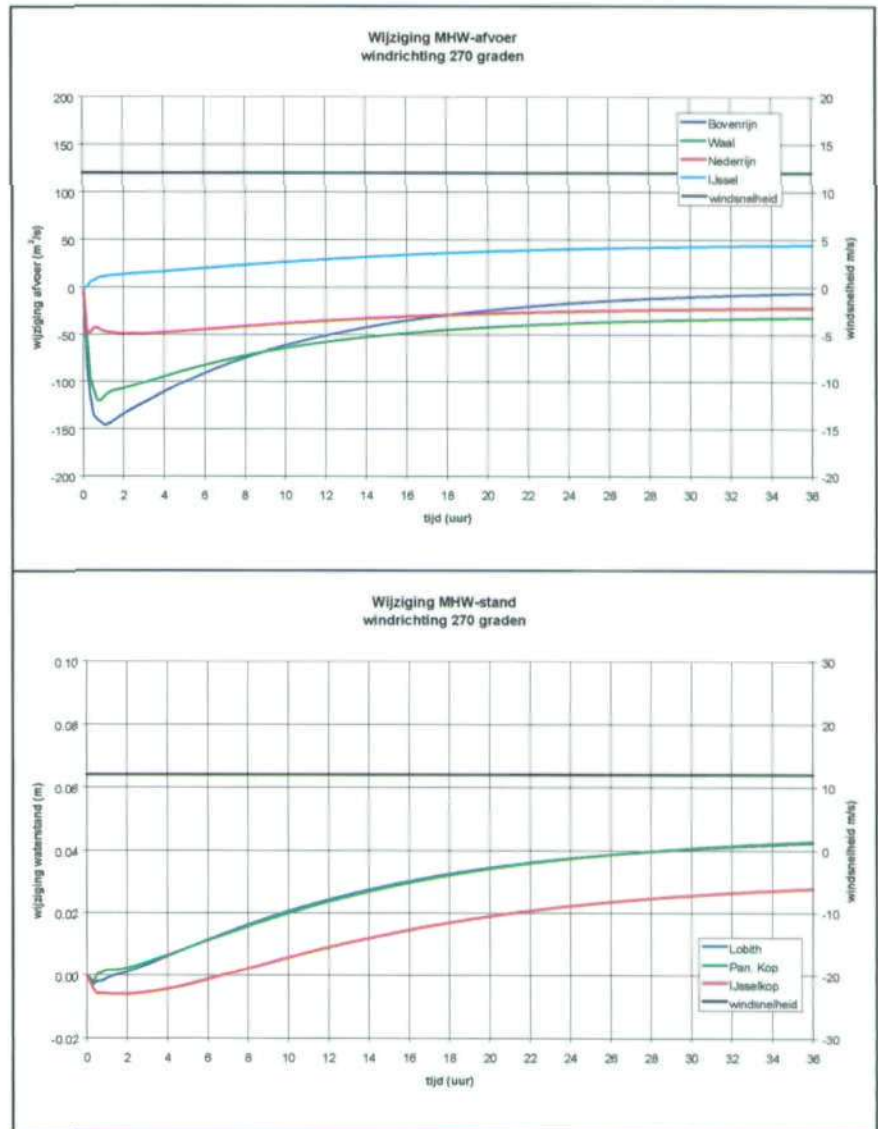
Figuur 7 Waalafvoer en wind. Verandering van de Waalafvoer als functie van de windsnelheid voor vier windrichtingen.



Alle bovenstaande berekeningen zijn uitgevoerd bij stationaire wind en afvoer. Wat er gebeurt wanneer de windsnelheid een functie van de tijd is, is uitgezet in Figuur 8. In deze berekening neemt op $T = 0$ de windsnelheid instantaan toe van 0 naar 12 m/s uit het westen. Het effect op de afvoer is maximaal op $T = 1$ uur, en neemt daarna langzaam af naar de hierboven berekende stationaire waarde. Het is echter niet zozeer de afvoerverdeling die wordt beïnvloed, als wel de grootte van de afvoer als geheel. Door de wind neemt de waterstand toe, hetgeen betekent dat er meer water geborgen wordt in het profiel. Omdat

het Sobekmodel begint bij Ruhrort en het windveld zich ook uitstrekt over de Niederrhein, komt er zodra de wind opsteekt bij Lobith tijdelijk minder water binnen. Ingrijpen in de afvoerverdeling is dan ook niet nodig, omdat voor de afzonderlijke takken de afvoeren onder MHW-niveau blijven. Wel nemen door opwaaiing de waterstanden toe, maar dat is door beïnvloeding van de afvoer niet te corrigeren, althans niet voor alle takken tegelijk.

Figuur 8 Dynamisch effect van wind. Op $t=0$ neemt de windsnelheid instantaan toe tot 12 m/s uit het westen.



Bij Figuur 8 zijn een aantal kanttekeningen te plaatsen. Ten eerste zal de wind niet instantaan toenemen, maar is een geleidelijke toename van de windsnelheid waarschijnlijker. Dit heeft tot gevolg dat het dynamisch effect minder geprononceerd zal zijn. Ten tweede heeft een toenemende westenwind weliswaar een tijdelijke afname van de afvoer tot gevolg, maar het omgekeerde doet zich voor als tijdens MHW de westenwind plotseling afneemt. De opwaaiing op de Niederrhein valt dan weg, en het water dat daarmee geborgen was, komt nu als extra afvoer bij Lobith binnen. Ten derde is in Figuur 8 gerekend met hetzelfde windveld over het hele Sobekmodel. Als de wind een meer plaatselijk karakter heeft, zijn ook de dynamische effecten navenant kleiner.

Tot slot wordt in Figuur 7 geïllustreerd dat het effect op de afvoerverdeling snel toeneemt met de windsnelheid. Was het effect op de Waalafvoer bij 12 m/s (krachtige wind) nog maar enkele tientallen m³/s, bij 32 m/s (zeer zware storm) is het al enkele honderden m³/s. De kans dat een zeer zware storm samenvalt met de top van de MHW-golf is echter gering.

3.2 Zijdelingse toestroming

Tijdens een MHW-golf op de Rijntakken zal ook het wateraanbod vanuit het binnendijkse gebied in het Nederlandse deel van het stroomgebied groot zijn. Dit water zal met gemalen of onder natuurlijk verval op de rivier geloosd worden en zal op de betreffende riviertak tot hogere waterstanden leiden. Wanneer de lozing dicht bij een splitsingspunt plaatsvindt, dan is de waterstandsverhoging tot daar merkbaar, en is zo van invloed op de afvoerverdeling. Dit is met Sobek uitgewerkt door bij een stationaire MHW-afvoer van 16.000 m³/s op de Rijntakken relaties af te leiden tussen de grootte en de locatie van de zijdelingse toestroming en de afvoerverdeling. Uit de berekeningen blijkt dat er bij benadering een exponentieel verband bestaat tussen de verstoring van de afvoerverdeling op de betreffende tak en de afstand van het lozingspunt tot het eerste bovenstroomse splitsingspunt. In formule:

$$\Delta Q_{tak} = \alpha \cdot Q_{tot} \cdot e^{-x/\lambda}$$

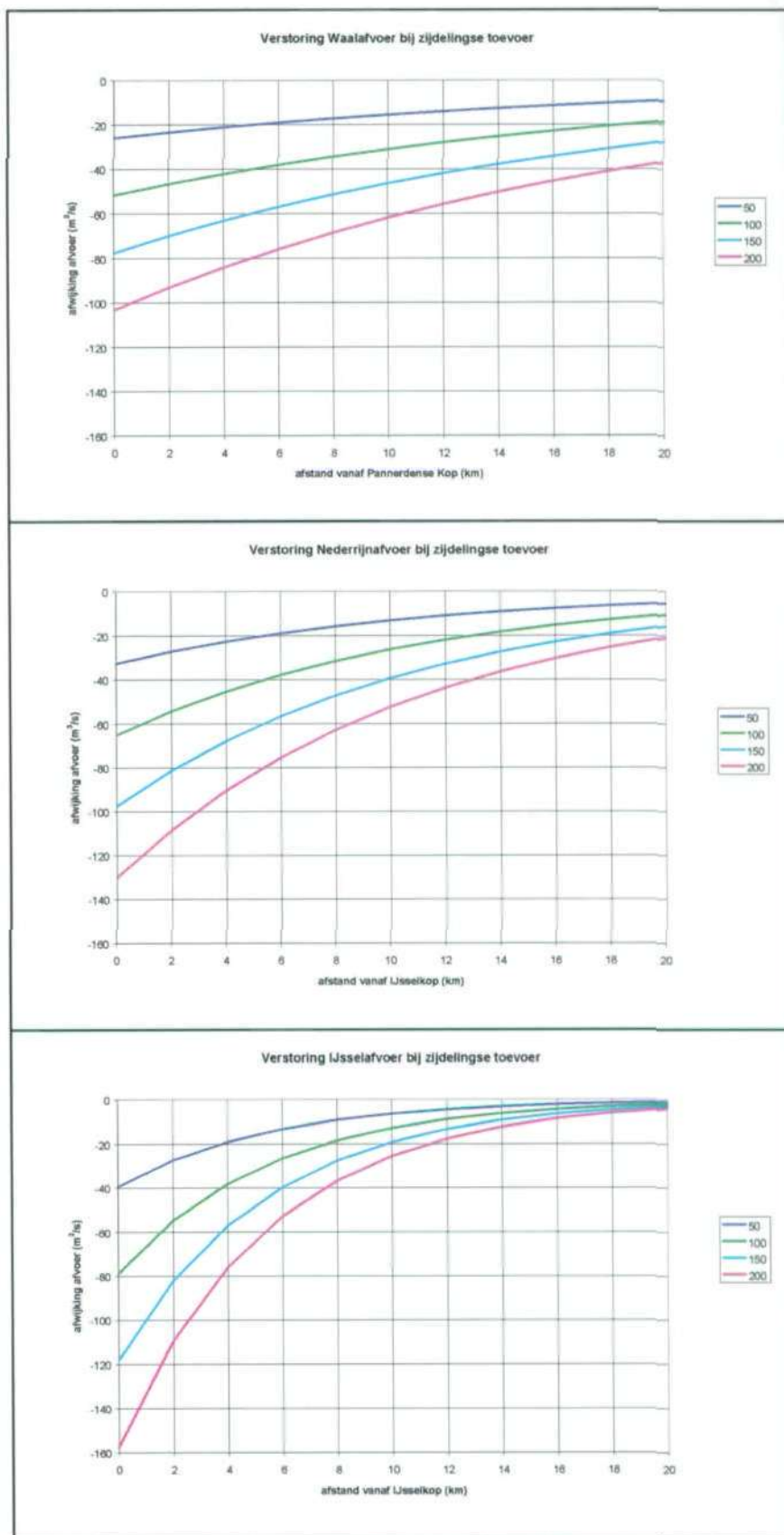
De reductiefactor α en de lengteschaal λ (zie Tabel 3) zijn met curvefitting bepaald uit de Sobekresultaten. Vanwege de continuïteit is de α -waarde van de Waal tegengesteld aan die van het Pannerdens Kanaal, en is die van het Pannerdens Kanaal gelijk aan die van Nederrijn en IJssel samen. In de tabel zijn de α -waarden voor Nederrijn en IJssel bij zijdelingse toestroming op het Pannerdens Kanaal exclusief de toegenomen afvoer op deze takken als gevolg van zijdelingse toestroming zelf. Van deze zijdelingse toestroming zal 51% naar de Nederrijn gaan en 49% naar de IJssel. In Figuur 9 zijn de effecten op de afvoerverdeling gegeven bij een zijdelingse toestroming van 200 m³/s.

Tabel 3 Parameters verstoring afvoerverdeling door zijdelingse toestroming.

tak met zijdelingse toestroming	λ (km)	α -Waal (-)	α -Pan. Kan. (-)	α -Nederrijn (-)	α -IJssel (-)
Waal	19,5	-0,52	+0,52	+0,27	+0,25
Pannerdens Kanaal	9,2	+0,63	-0,63	-0,32	-0,31
Nederrijn	11,0	+0,23	-0,23	-0,65	+0,42
IJssel	5,5	+0,27	-0,27	+0,52	-0,79

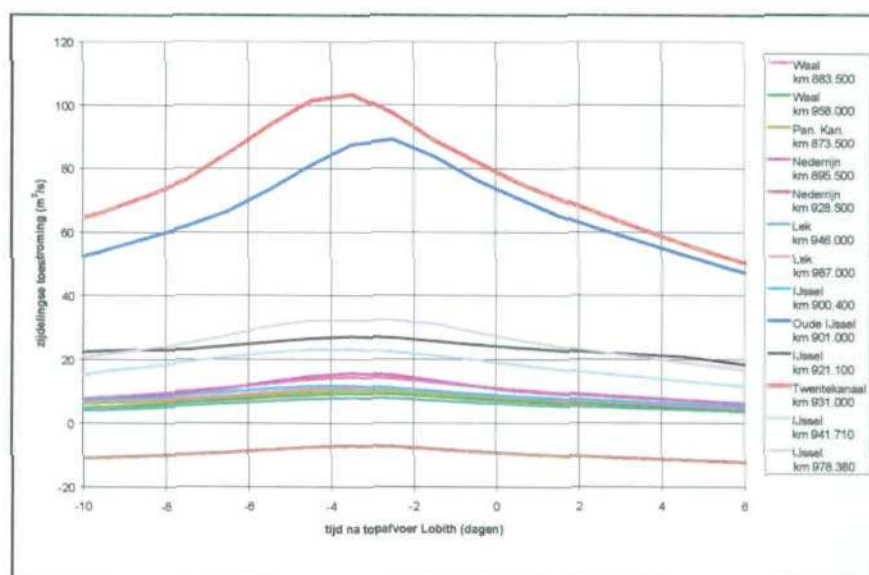
Uit de tabel en de figuur valt af te leiden dat de demping het sterkst is op de IJssel (kleinste λ) en het zwakst op de Waal. Voor kleine afstanden tot het splitsingspunt ($x \ll \lambda$) is de doorwerking op de afvoerverdeling echter het sterkst voor de IJssel (grootste α) en het zwakst voor de Waal. Dit komt omdat een lozing van bijvoorbeeld 200 m³/s op de IJssel een procentueel grotere afvoertoeename is dan op de Waal.

Figuur 9 Effect op de afvoerverdeling van zijdelingse toestroming. Het effect neemt af naarmate de zijdelingse toevoer kleiner is en de afstand tot het splitsingspunt groter.



Bij de vijfjaarlijkse herziening van de Maatgevende Hoogwaterstanden wordt rekening gehouden met zijdelingse toestroming. Op basis van metingen, uitgevoerd bij lagere hoogwaters, worden schattingen gemaakt voor de zijdelingse toestroming (of onttrekking) tijdens MHW. Deze waarden, eventueel geclusterd per traject, worden als puntlading aan het WAQUA-model opgelegd. In Figuur 10, ontleend aan lit. 1, zijn de zijdelingse toestromingen ten behoeve van de MHW-berekeningen uitgezet. Voor de meeste lozingspunten is de bijdrage gering (minder dan 30 m³/s) en/of ligt het lozingspunt op grote afstand van het splitsingspunt. Uitzonderingen zijn de Oude IJssel (x = 18,3 km) en het Twentekanaal (x = 43,3 km) langs de IJssel, met topafvoeren van respectievelijk 89 en 104 m³/s.

Figuur 10 Zijdelingse toevoer bij MHW. De grootte van alle zijdelingse toevoeren als functie van de tijd, zoals toegepast bij de MHW-berekeningen.



Met Sobek is onderzocht wat het effect op de afvoerverdeling is van de zijdelingse toestromingen volgens Figuur 10. Met een berekening zonder zijdelingse toestroming als referentie, zijn per tak steeds alle bij die tak horende zijdelingse toestromingen toegevoegd. Uit Tabel 4 blijkt dat de verstoring van de afvoerverdeling nergens meer is dan enkele m³/s.

Tabel 4 Effect zijdelingse toestroming op afvoerverdeling.

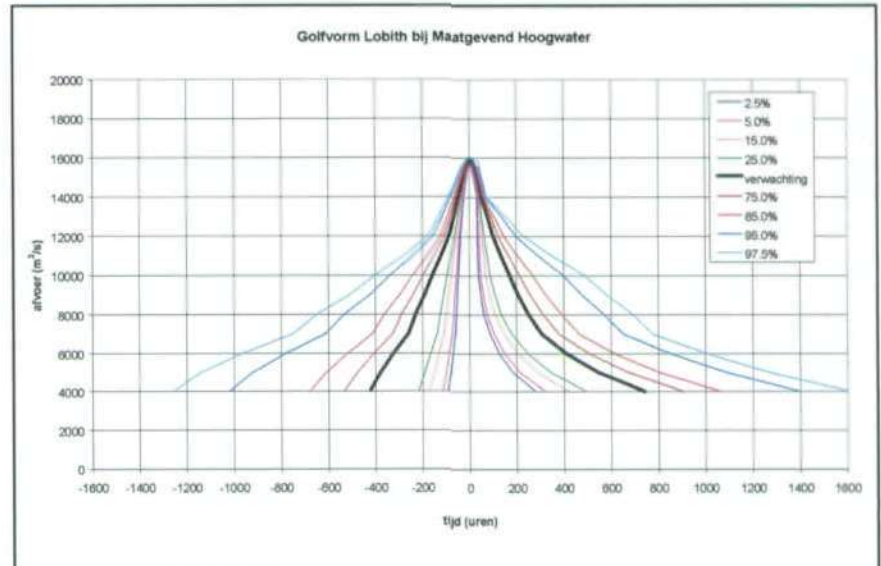
tak met zijdelingse toestroming	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
Waal	-3,1	+1,6	+1,5
Pannerdens Kanaal	+2,4	-1,0	-1,4
Nederrijn	+0,5	-1,3	+1,0
IJssel	+1,5	+3,1	-4,8
alle takken	+1,5	+2,3	-3,9

3.3 Golfvorm

De MHW-standen bij 16.000 m³/s worden berekend bij een op basis van lit. 16 vastgestelde golfvorm bij Lobith. Er is 50% kans dat de MHW-golf breder (of smaller) is dan deze vorm. Andere golfvormen kunnen een andere afvoerverdeling opleveren. Met het instrumentarium behorend bij lit. 16 is het mogelijk om golfvormen te genereren voor elke gegeven kans van onderschrijven, zie Figuur 11. Met Sobek is gekeken wat het effect van de

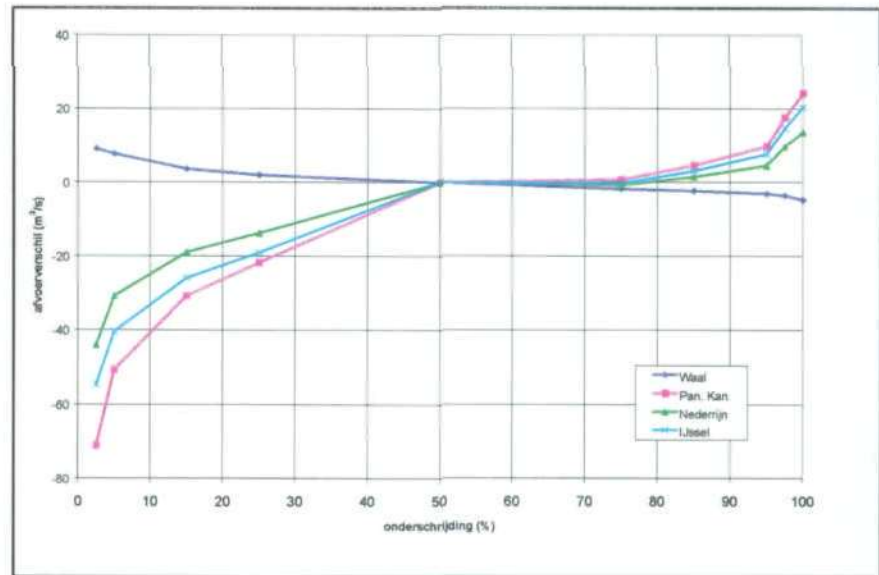
verschillende golfvormen is op de maximale afvoer aan het begin van iedere tak (Figuur 12) en de waterstanden op drie locaties (Figuur 13). De berekeningen zijn vooralsnog uitgevoerd bij een vaste rivierbodem, dus zonder de morfologische processen tijdens een hoogwatergolf in ogenschouw te nemen. In de volgende paragraaf zal hierop worden teruggekomen.

Figuur 11 MHW-golven bij Lobith en hun onderschrijdskansen. Hoe groter de kans, hoe breder de golf. De golf aangegeven met de dikke zwarte lijn wordt gebruikt voor MHW-berekeningen.

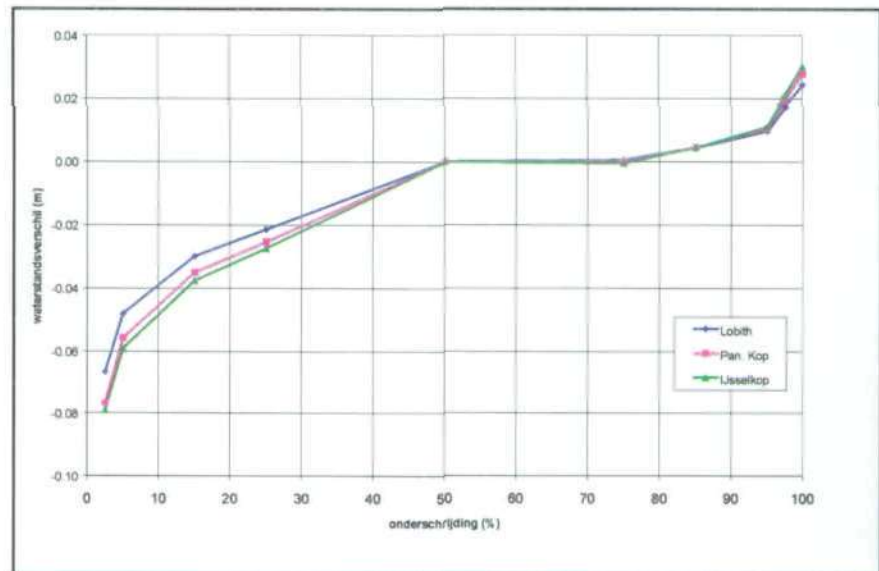


Omdat de golven dynamisch worden doorgerekend, zullen de tijdstippen waarop de maximale afvoer optreedt niet voor alle takken samenvallen. Dit betekent dat in Figuur 12 de som van de afvoerverschillen per splitsingspunt niet gelijk aan nul hoeft te zijn. Uit Figuur 12 blijkt verder dat smalle golven ($p < 50\%$) iets meer afvoer naar de Waal opleveren, en iets minder naar de overige takken. Uit Figuur 13 blijkt echter dat als gevolg van de sterke topvervlakking behorend bij een smalle golf de waterstanden op alle drie de locaties zijn afgenomen, en dus ook benedenstrooms van deze locaties. Hoewel de afvoerverdeling afwijkt, is het eventueel corrigeren ervan bij smalle golven dan ook niet nodig. Bij brede golven ($p > 50\%$) doet zich het omgekeerde effect voor: iets minder afvoer naar de Waal en overal iets hogere waterstanden. Dit is niet te verhelpen door de afvoerverdeling te corrigeren, omdat als gevolg van de kleinere topvervlakking nu op alle takken de waterstanden boven MHW-niveau uitstijgen. Wel is bij brede golven te overwegen om ten koste van de ene tak een afvoercorrectie uit te voeren ten gunste van een andere tak, om daarmee de hogere waterstanden te compenseren die meer stroomafwaarts op de tak optreden als gevolg van het ontbreken van (voldoende) topvervlakking. Zo is bijvoorbeeld bij de standaardgolf de topvervlakking aan de benedenloop van de IJssel 0,10 m. Bij een zeer brede golf treedt deze topvervlakking niet op, en zou er bij de IJsselkop 80 m³/s minder water naar de IJssel moeten stromen, om het tekort aan topvervlakking van 0,10 m in de benedenloop te compenseren. Zou men voor de Lek of de Waal het tekort aan topvervlakking willen compenseren, dan moet ook de situatie in het benedenrivierengebied in de beschouwing worden betrokken.

Figuur 12 Effect van de golfvorm op de afvoerverdeling. Het getoonde effect is deels het gevolg van een veranderde afvoerverdeling, en deels van een veranderde topvervlakking.



Figuur 13 Effect van de golfvorm op de waterstanden. Ook hier een gecombineerd effect van veranderde afvoerverdeling en topvervlakking.

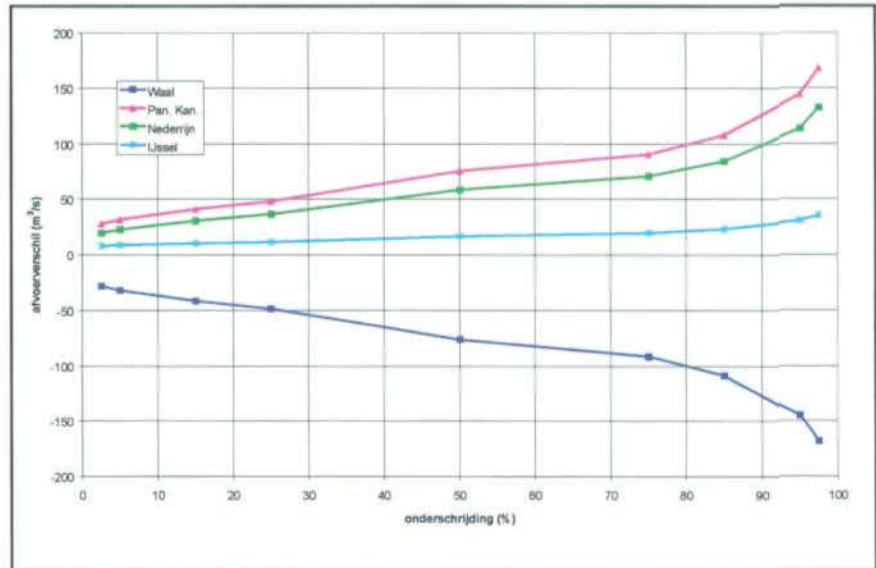


3.4 Morfodynamiek tijdens MHW

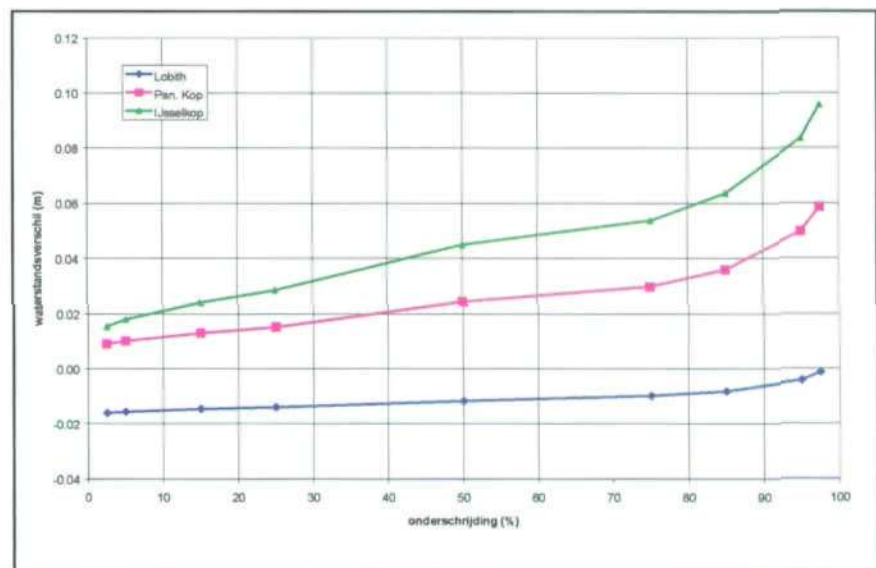
Alle bovenstaande berekeningen zijn uitgevoerd bij een vaste bodem van het zomerbed. Het is echter waarschijnlijk dat de MHW-golf veranderingen in de bodemligging bewerkstelligd, die op hun beurt weer van invloed zijn op de afvoerverdeling. Dit is onderzocht door met Sobek elk van de golfvormen van Figuur 11 door te rekenen met een beweeglijke zomerbedbodem. De berekeningen zijn quasi-stationair uitgevoerd, wat wil zeggen dat de MHW-golf wordt doorgerekend alsof op elke tijdstap de afvoer stationair is. Hiermee worden de dynamische effecten van de golf, zoals hysteresis en topvervlakking, verwaarloosd, maar deze zijn voor de morfologische processen meestal toch van ondergeschikt belang. Het voordeel van quasi-stationair rekenen is dat de berekening veel stabiel is, en dat het voor de waterbeweging van de Nederlandse Rijntakken niet meer uitmaakt of de bovenrand van het model bij Ruhrort of bij Lobith ligt. Bovendien is bij quasi-stationair rekenen per splitsingspunt de som van de afvoerverschillen wel gelijk aan nul. Voor elk van

de golven is de maximale afvoer per tak vergeleken met de stationaire afvoerdeling bij een vaste bodem, en het resultaat is uitgezet in Figuur 14. Het effect op de waterstanden is gegeven in Figuur 15. Voor de betekenis van de onderschrijdingspercentages wordt weer verwezen naar Figuur 11.

Figuur 14 Effect van golfvorm en morfologie op de afvoerdeling. Door quasi-stationair rekenen is het effect van topvervlakking geëlimineerd.

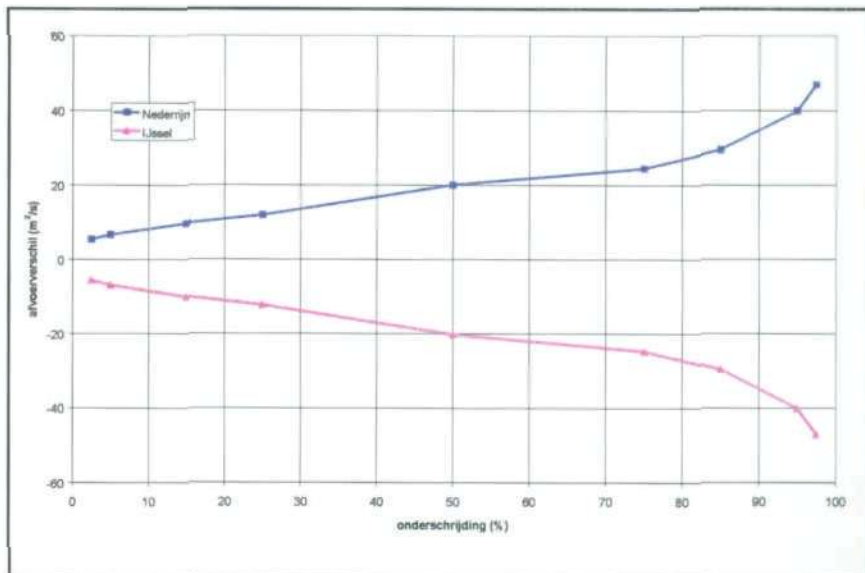


Figuur 15 Effect van golfvorm en morfologie op de waterstanden.



Het effect op de afvoerdeling is aanzienlijk, in de orde van tientallen m³/s bij de standaard MHW-golf. De Waal trekt in alle gevallen minder afvoer, een effect dat toeneemt naarmate de golf breder wordt. Dit laatste hoeft niet te verbazen, want een brede golf betekent dat er een langere periode is met extreme afvoeromstandigheden, en dat dus het effect op de bodemligging sterker is. Het Pannerdens Kanaal krijgt navenant meer afvoer, wat zich vervolgens verdeelt over Nederrijn en IJssel. Wanneer voor de afvoertoe name van het Pannerdens Kanaal wordt gecorrigeerd, blijkt dat bij de IJsselkop een verschuiving is opgetreden van meer afvoer naar de Nederrijn ten koste van de IJssel, zie Figuur 16.

Figuur 16 Effect op de afvoerverdeling IJsselkop. Het resterend effect na correctie voor veranderingen in de afvoer van het Pannerdens Kanaal.



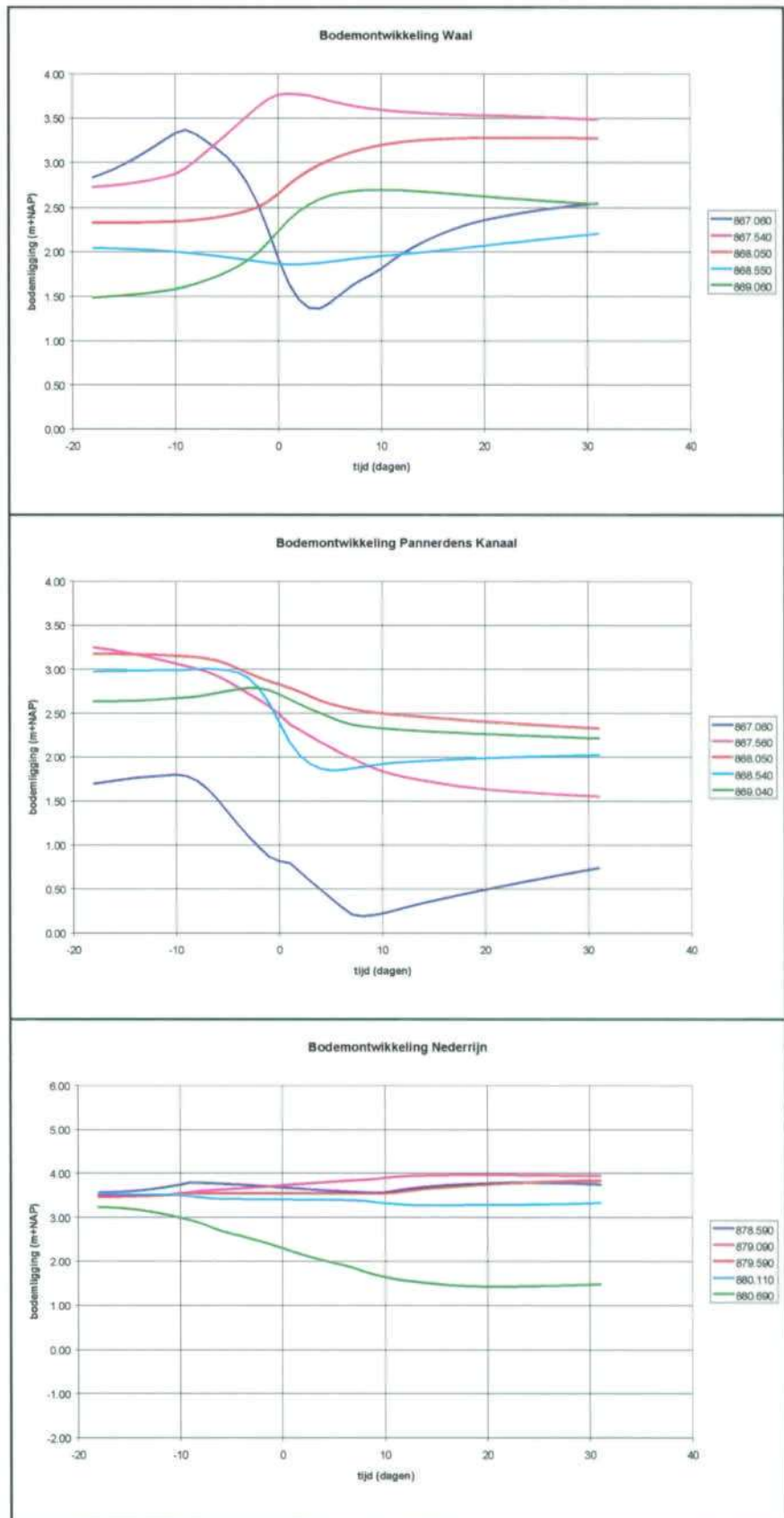
De afvoerverdeling wordt bepaald door de bodemligging van de eerste paar kilometer benedenstrooms van het splitsingspunt. In Tabel 5 is voor het moment van de afvoertop de verandering uitgezet van de trajectgemiddelde bodemligging vanaf het splitsingspunt. Er is te zien dat ongeacht de beschouwde trajectlengte de Waal aanzandt en het Pannerdens Kanaal uitschuurt, waardoor de Waalafvoer afneemt. Bij de IJsselkop daalt bodem van de IJssel sneller dan die van de Nederrijn, maar omdat het zomerbed van de Nederrijn breder is, neemt de Nederrijnafvoer toe ten koste van de IJsselafvoer. Bij morfologische berekeningen heeft de rivierbodem ten tijde van de top een veel onregelmatiger verloop dan in berekeningen met een vaste bodem. Naast veranderingen in de trajectgemiddelde bodemligging, is ook het onregelmatiger verloop van de bodemligging van invloed op de afvoerverdeling.

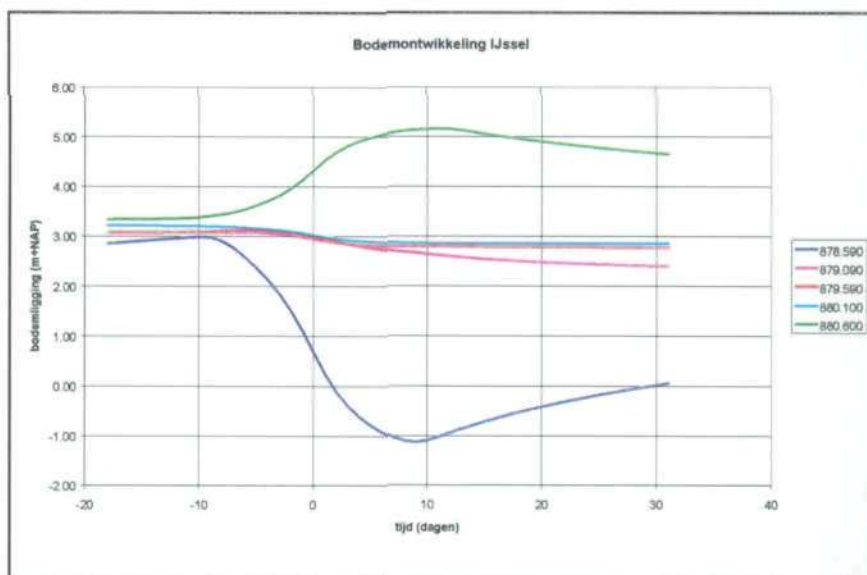
Tabel 5 Verandering in trajectgemiddelde bodemligging.

trajectlengte vanaf splitsingspunt (km)	Waal (m)	Pan. Kanaal (m)	Nederrijn (m)	IJssel (m)
2	+0,20	-0,50	-0,13	-0,31
5	+0,20	-0,09	-0,10	-0,11
10	+0,10	-0,03	-0,02	-0,08

Hoe de veranderingen in bodemligging zich in de tijd voltrekken is te zien in Figuur 17, waar per tak de bodemontwikkeling van de eerste paar kilometer is uitgezet. Wat vooral opvalt is dat bodemontwikkeling najipt op de MHW-golf. Het laagste danwel hoogste punt in de bodemligging treedt pas op enkele dagen nadat de top Lobith is gepasseerd. Dit is een verschijnsel dat destijds ook al werd geconstateerd bij het eerste numerieke morfologische model van het Pannerdens Kanaal (lit. 8).

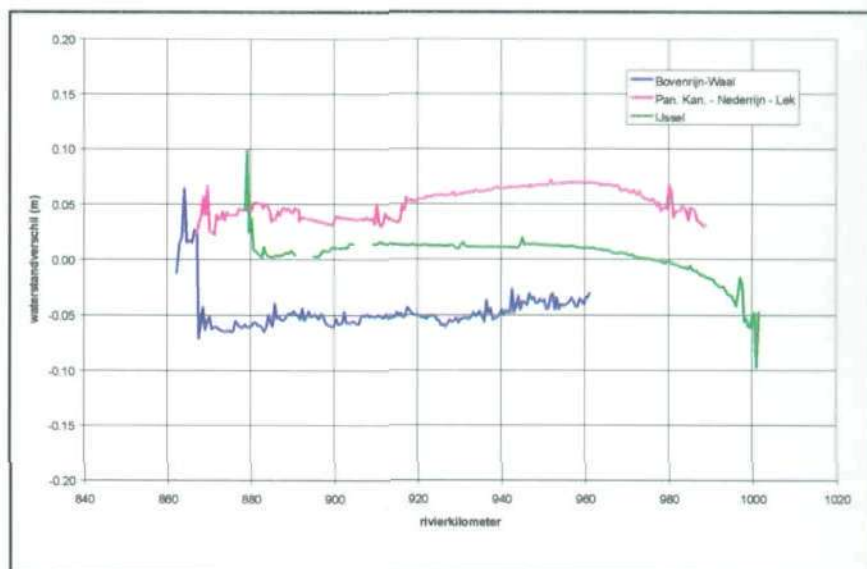
Figuur 17 Bodemontwikkeling bovenloop takken tijdens MHW.





Blijkens Figuur 15 leidt het in rekening brengen van de morfodynamiek voor alle golfvormen tot iets lagere waterstanden te Lobith en hogere waterstanden op de splitsingspunten, een effect dat sterker wordt naarmate de golf breder wordt. Wanneer echter voor de standaardgolf het lengteprofiel van de waterstandsverschillen wordt uitgezet (Figuur 18), dan blijkt dat juist Lobith en de splitsingspunten niet geheel representatief zijn voor het morfologisch effect op de waterstanden. Benedenstrooms van deze locaties neemt de waterstand relatief sterk toe of af, deels als gevolg van morfodynamiek, deels als gevolg van de veranderde afvoerdeling.

Figuur 18 Lengteprofiel MHW-verschillen als gevolg van morfodynamiek.



Het morfologisch model in Sobek is geijkt op de bodemligging en de sedimenttransporten over langere perioden. Een van de grootste onzekerheden bij de ijking is de verdeling van het sediment over de splitsingspunten. In het huidige model gaat bij de Pannerdense Kop op jaarbasis ca. 84% naar de Waal en 16% naar het Pannerdens Kanaal, en bij de IJsselkop 66% naar de Nederrijn en 34% naar de IJssel. Om de gevoeligheid van de afvoerdeling tijdens MHW voor de sedimentverdeling te testen, is per splitsingspunt steeds de

verdeling met 5 procentpunten verhoogd of verlaagd. Er blijkt dat dit een marginaal effect heeft op de afvoerverdeling: een verstoring van niet meer dan enkele m^3/s . Zelfs wanneer Sobek zo wordt ingesteld dat 99% van het sedimentaanbod naar de Waal gaat, is de verstoring in de afvoerverdeling niet meer dan $6 m^3/s$. Waarom dit zo weinig is blijkt als we kijken naar de bijbehorende bodemontwikkeling. Een verandering van de verdelingsfactoren is te zien als een morfologische verstoring die vanaf het splitsingspunt met een zekere voortplantingssnelheid een benedenstroomse riviertak inloopt. Omdat een MHW-golf op de tijdschaal van de morfologie relatief kort duurt, dringt de verstoring niet verder door dan een paar honderd meter, en is de invloed op de bodemligging, en dus op de afvoerverdeling, minimaal. De invloed op de afvoerverdeling van de toegenomen onregelmatigheid in de bodemligging tijdens MHW speelt nu niet, omdat deze onregelmatigheid ook al in de referentiesituatie zit.

Ten tijde van de eerste MHW-berekeningen, in de jaren 50, was men zeer beducht voor veranderingen in de afvoerverdeling tijdens MHW als gevolg van morfodynamiek. Dit vond zijn oorzaak in het feit dat tijdens het hoogwater van 1926 de bovenloop van het Pannerdens Kanaal plaatselijk meer dan 2 meter was uitgeschuurd (Figuur 19). Dat uiteindelijk toch niet teveel water naar het noorden stroomde, was slechts te 'danken' aan dijkdoorbraken langs de Waal. De uitschuring was deels daaraan te wijten, dat het doorstroomprofiel destijds zeer nauw was omdat de Pannerdense overlaat en de groene rivier nog niet bestonden. Voor de MHW-berekeningen werd in de jaren 50 aangenomen dat de bodem over enkele kilometers met maximaal 1 meter kon uitschuren. Om te compenseren voor de verstoring van de afvoerverdeling die dit tot gevolg zou hebben, werd bij de evenwichtsafvoer een toeslag opgeteld om zo tot de maatgevende afvoer per tak te komen (lit. 42). De grootte van de toeslag werd berekend door te kijken naar de ongunstigste combinatie van aanzanding en uitschuring op de takken. De toeslagen van de Nederrijn en de IJssel zijn relatief hoog, omdat deze takken benedenstrooms van twee splitsingspunten liggen, en dus tweemaal met een onzekerheid in de afvoerverdeling te maken krijgen. Deze aanpak resulteerde in de maatgevende afvoeren van Tabel 6. Een consequentie van het werken met afvoertoeslagen was, dat de maatgevende hoogwaterstanden op de splitsingspunten vanuit de verschillende takken gezien niet gelijk waren.

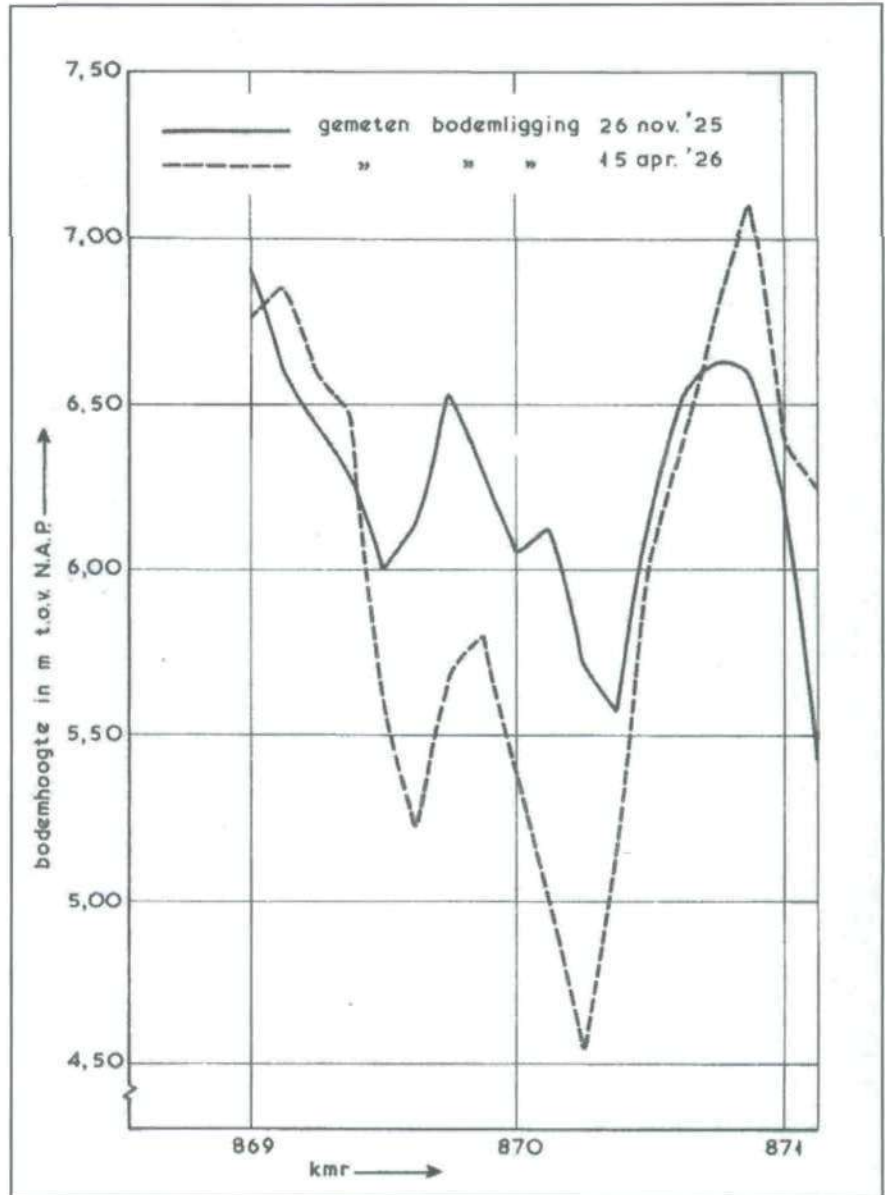
Tabel 6 Evenwichtsafvoer en maatgevende afvoer in 1963.

<i>riviertak</i>	<i>evenwichtsafvoer</i> (m^3/s)	<i>afvoertoeslag</i> (m^3/s)	<i>maatgevende afvoer</i> (m^3/s)
Bovenrijn	18.000	0	18.000
Waal	11.250	150	11.400
Pannerdens Kanaal	6.750	350	7.100
Nederrijn	3.975	225	4.200
IJssel	2.775	275	3.050

In de jaren 50 en 60 zijn diverse studies uitgevoerd ten behoeve van verruiming van de Waal en/of het Pannerdens Kanaal om zo de druk op het Pannerdens Kanaal te verminderen, of ten behoeve van het vastleggen van de bodem van het Pannerdens Kanaal (lit. 3, 39, 40, 43). Eind jaren 60 brak het inzicht door dat de veranderingen in de bodemligging tijdens MHW minder groot waren dan eerder werd gevreesd. Met wat waarschijnlijk het eerste numerieke morfologisch model van het Pannerdens Kanaal was, werd in 1969 berekend dat de afvoertoeename door morfodynamiek tijdens MHW voor het Pannerdens Kanaal slechts $65 m^3/s$ zou bedragen (lit. 8, 23). Dit spoort zeer goed met de

75 m³/s toename die nu met Sobek wordt berekend, zij het dat destijds alleen naar de bodemontwikkeling van het Pannerdens Kanaal werd gekeken, en nu met Sobek ook die van de Waal wordt meegenomen.

Figuur 19 Bodemligging Pannerdens Kanaal bij hoogwater 1926. Uitgezet is de gemeten bodemligging vlak voor en na het hoogwater.



3.5 Retentiegebieden

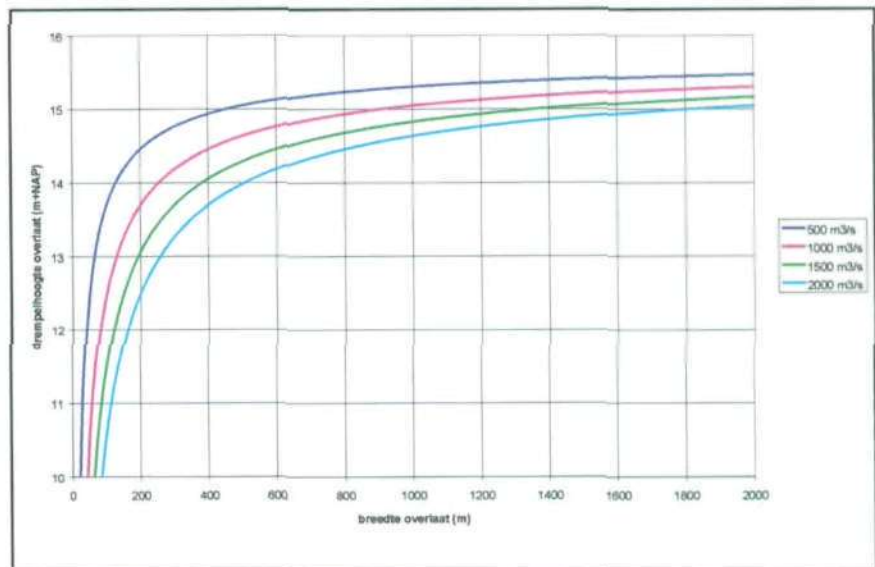
Op dit moment zijn retentiegebieden geen onzekerheidsbron voor de afvoerverdeling, omdat er langs de Nederlandse Rijntakken nog geen retentiegebieden zijn aangelegd. Het ziet er echter naar uit dat hier in de nabije toekomst verandering in komt, en daarom is onderzocht welke onzekerheid in de afvoerverdeling de inzet van retentiegebieden met zich meebrengt. Retentiegebieden verlagen de waterstand benedenstrooms van het inlaatpunt door het onttrekken van water. Echter ook bovenstrooms van het inlaatpunt vindt een waterstandsverlaging plaats, die via een stuwkromme asymptotisch tot nul terugloopt. Als het inlaatpunt op korte afstand benedenstrooms van een splitsingspunt ligt, dan geeft deze verlaging van de waterstand een verstoring

van de afvoerverdeling. Op zich is dit geen onzekerheidsbron, omdat goed is te berekenen hoe groot de verstoring zal zijn, en omdat het mogelijk is door aanvullende maatregelen hiervoor te corrigeren. Onzekerheden in de afvoerverdeling ontstaan pas als de grootte van de parameters die een retentiegebied beschrijven niet precies bekend is. Te denken valt aan:

- *De kruinhoogte van de overlaat.* Door uitvoeringsfouten of verzakking kan de kruin een andere hoogte hebben verondersteld wordt.
- *De breedte van de overlaat.* Bij overlaten met een variabele breedte, kan bij een MHW-gebeurtenis onbedoeld de breedte niet juist zijn ingesteld.
- *De overlaatcoëfficiënt.* De waarde hiervan hangt sterk af van de vormgeving van de kruin en het lokale stromingspatroon.
- *Dwarsverhang op de rivier.* Naast het dwarsverhang door bochtstroming, waarop redelijk is te anticiperen, kan wind voor een extra dwarsverhang zorgen. Afhankelijk van de windrichting is de waterdiepte op de kruin, en dus de afvoer over de overlaat, dan groter of kleiner.

De invloed van kruinhoogte en overlaatcoëfficiënt zullen hieronder nader worden onderzocht. Aan dwarsverhang door wind is niet expliciet aandacht besteed, maar dit is te zien als een variant van een te hoge of te lage kruinhoogte van de overlaat. Waar het uiteindelijk om gaat is de onzekerheid in de waterdiepte op de kruin, en dan maakt het niet uit of deze wordt veroorzaakt door een te lage (hoge) kruinhoogte of een te hoge (lage) waterstand. Naar de breedte van de overlaat wordt evenmin expliciet gekeken, omdat onzekerheden in breedte met de overlaatformule zijn uit te drukken in onzekerheden in de overlaatcoëfficiënt. Een 10% grotere overlaatcoëfficiënt heeft hetzelfde effect als een 10% grotere breedte.

Figuur 20 *Kruinhoogte en -breedte.*
De overlaatdimensies bij gegeven onttrekking en een waterstand van 15,75 m+NAP op de rivier. Een brede overlaat is gevoelig voor de kruinhoogte, een smalle overlaat voor de kruinbreedte.



Als eerste wordt schetsmatig de overlaat van het retentiegebied gedimensioneerd. Het retentiegebied zelf wordt hier niet gedimensioneerd, maar aangenomen wordt dat het groot genoeg is om het onttrokken volume te kunnen bergen. Uitgangspunt is, dat het retentiegebied bedoeld is om verdere verruimingsmaatregelen op alle takken benedenstrooms van de Pannerdense Kop overbodig te maken. Een retentiegebied met het inlaatpunt bovenstrooms van de Pannerdense Kop is niet van invloed op de onzekerheid in de afvoerverdeling, en hoeft dus niet onderzocht te worden. Een inlaatpunt aan

het Pannerdens Kanaal is af te raden, omdat dan grote hoeveelheden extra afvoer door het relatief nauwe Pannerdense Kanaal geleid moeten worden. Het retentiegebied wordt daarom aan de bovenloop van de Waal gesitueerd. De MHW-golf van 16.000 m³/s moet zodanig worden afgetopt dat de waterstand op de Pannerdense Kop behorend bij 15.000 m³/s bij de huidige riviergeometrie niet wordt overschreden. De afvoer op het Pannerdens Kanaal, Nederrijn en IJssel is dan gelijk aan die welke hoort bij een afvoer van 15.000 m³/s bij Lobith en de huidige riviergeometrie. De overlaat zal onder maatgevende omstandigheden dus in ieder geval 1.000 m³/s moeten kunnen verwerken, zijnde het verschil tussen de oude (15.000 m³/s) en huidige MHW-afvoer bij Lobith (16.000 m³/s), maar bovendien nog wat extra om via een stuwkromme op de Pannerdense Kop precies op de gewenste waterstand uit te komen. Deze extra hoeveelheid neemt exponentieel toe met de afstand tussen de Pannerdense Kop en het inlaatpunt. Bovendien zal door de grote onttrekking de afvoer benedenstrooms van het retentiegebied minder zijn dan de huidige afvoercapaciteit van de Waal. Deze twee aspecten pleiten ervoor om het inlaatpunt zo ver mogelijk bovenstrooms op de Waal te situeren. In het onderstaande wordt daarom uitgegaan van een inlaat op km 874 op de Waal, ca. 7 kilometer benedenstrooms van de Pannerdense Kop. Daarbij kan gedacht worden aan een retentiegebied in de Ooypolder of in de Overbetuwe. De MHW-stand op deze locatie is ongeveer 15,75 m+NAP.

Tabel 7 Beschrijving van twee overlaatvarianten.

parameter	hoge en brede overlaat	lage en smalle overlaat
locatie (km)	874	874
kruinhoogte (m+NAP)	15,00	14,00
breedte overlaat (m)	1400	400
overlaatcoëfficiënt (-)	1,0	1,0
maximale onttrekking (m ³ /s)	1465	1465
benodigd volume (Mm ³)	501	837

In Figuur 20 is voor een waterstand van 15,75 m+NAP uitgezet met welke combinaties van kruinhoogte en breedte van de overlaat een gegeven onttrekking gerealiseerd kan worden. Globaal kan onderscheid worden gemaakt tussen overlatten met een kleine breedte en een lage kruinhoogte (links in de figuur), en overlatten met een grote breedte en een hoge kruinhoogte (rechts in de figuur). Uit de loop van de lijnen (horizontaal of verticaal) is af te leiden dat de afvoer bij een smalle, lage overlaat gevoelig is voor onzekerheden in de breedte en de overlaatcoëfficiënt, en bij een hoge brede overlaat voor onzekerheden in de kruinhoogte en de waterstand. Voor twee voorbeelden, gespecificeerd in Tabel 7, is het effect op de afvoerverdeling berekend van onzekerheid in de overlaatcoëfficiënt en van de kruinhoogte. Reële grenzen voor de overlaatcoëfficiënt zijn 0,8 en 1,2, voor de kruinhoogte wordt aangenomen dat deze 0,20 m kan afwijken.

Het effect op de Waalafvoer is samengevat in Tabel 8. Uit de tabel blijkt dat de afwijkingen in de afvoerverdeling in de orde liggen van enkele tientallen m³/s. De berekeningen bevestigen dat de lage, smalle overlaat vooral gevoelig is voor de overlaatcoëfficiënt (breedte), en de hoge, brede overlaat vooral voor de kruinhoogte (waterstand). Uit aanvullende berekeningen blijkt dat de gevoeligheid van de afvoerverdeling voor de kruinhoogte afneemt naarmate de afstand tot de Pannerdense Kop groter wordt, maar dat de gevoeligheid voor de overlaatcoëfficiënt hetzelfde blijft.

Tabel 8 Verandering afvoer Pannerdens Kanaal bij retentiegebied op Waalkm 874.

parameter	waarde	afvoereffect hoge en brede overlaat (m ³ /s)	afvoereffect lage en smalle overlaat (m ³ /s)
overlaatcoëfficiënt (-)	0,8	-37	-51
overlaatcoëfficiënt (-)	1,2	+28	+38
wijziging kruinhoogte (m)	-0,20	+63	+37
wijziging kruinhoogte (m)	+0,20	-73	-42

Hoe hoger de kruin van de overlaat, hoe later in een hoogwatergolf het retentiegebied in werking treedt. Een hoge kruin heeft als voordelen dat het retentiegebied niet ook al bij lagere hoogwaters onderloopt, en dat het retentievolume kleiner kan zijn, zie Tabel 7. De benodigde retentievolumes zijn *niettemin zeer aanzienlijk, veel groter dan waar momenteel bijvoorbeeld aan gedacht wordt voor de Ooypolder en de Overbetuwe*. Uit de tabel is voorts af te lezen dat voor een overlaat op deze locatie (km 874) het kennelijk nodig is om 465 m³/s extra, boven op de 1.000 m³/s toename van de MHW-afvoer, aan het systeem te onttrekken om op de Pannerdense Kop de vereiste waterstandsaling te bereiken.

3.6 Falen van kades en overlaten

De afvoerverdeling over de splitsingspunten wordt bepaald door de riviergeometrie ter plaatse. Een belangrijk onderdeel van die geometrie zijn de kades en overlaten. Wanneer de kruin overstroomd is, wordt hier door lokale energieverliezen het water opgestuwd. Hoe groter het verval over de kade, hoe groter de stroomsnelheden op de kruin, en hoe groter ook het risico dat een kade bezwijkt. Indien tijdens hoogwater één van de kades in de omgeving van een splitsingspunt bezwijkt, heeft dit gevolgen voor de afvoerverdeling. Dat het bezwijken van kades en overlaten niet denkbeeldig is, blijkt wel uit de volgende opsomming (lit. 21, 40) van de kades en overlaten die in de 20^e eeuw in de omgeving van de splitsingspunten zijn bezweken:

- 1914, Oude Dijk ofwel Lobberdense kade (Geitenwaard);
- 1924; Suikerdam;
- 1926; Suikerdam;
- 1964, doorbraak Geitenwaardse dam;
- 1965, zomerdam Valeweerd;
- 1966, Geitenwaard en Kijfwaard;
- 1970, Pannerdense overlaat.

Met de zomerdam in de Valeweerd (1965) wordt mogelijk de Marsweg bedoeld, die in de jaren 80 ook regelmatig beschadigd raakte. Door de *ontzanding in de Vaalwaard ontstond bij hoogwater over deze kade een volkomen overlaat met een verval van enkele decimeters, en de grasmat was niet bestand tegen de stroomsnelheden van 2 m/s die daarbij optraden*. Eind jaren 80 is de kade verdedigd met breuksteen, waarna verdere problemen uitbleven.

Bij bovenstaande schadegevallen is niet altijd duidelijk wat met bezwijken precies wordt bedoeld: was er sprake van een bres, of raakte de kade alleen beschadigd zonder grote gevolgen voor de afvoerverdeling? Van de Pannerdense overlaat staat wel vast hoe groot de schade was. Tijdens het hoogwater van februari 1970 werd de bekleding van zuilenbasalt beschadigd (lit. 2), hetgeen de inleiding vormde tot het bezwijken van het

damwandgedeelte (Figuur 21). Na het hoogwater werd het benedenstroomse profiel gewijzigd en vastgelegd door grind met cementmortel. Het hoogwater van 1970 had een topafvoer van $9.850 \text{ m}^3/\text{s}$ bij Lobith, en was het hoogste sinds de aanleg van de Pannerdense overlaat ongeveer 10 jaar daarvoor.

Figuur 21 De Pannerdense overlaat na het hoogwater van februari 1970.



De gevolgen voor de afvoerverdeling van het bezwijken van kades en overlaten zijn onderzocht met WAQUA. Aan de hand van isolijnen van de waterstand zijn in het splitsingspuntengebied de kades geselecteerd waar bij MHW een groot verval over staat. Vervolgens is in elke kade een gat gemaakt van 1 à 2 roosterzellen. Met welke breedte dit precies overeenkomt is afhankelijk van de roosterdichtheid ter plaatse. De geselecteerde kades, de

breedte van de bres, en het effect op de afvoerverdeling zijn gegeven in Tabel 9. Door numerieke oorzaken en afronding is de balans van het afvoereffect niet voor alle locaties gelijk aan nul.

Tabel 9 Afvoereffect bij MHW van falen van kades en overlaten.

kade / overlaat	locatie	bres	Waal	Nederrijn	IJssel
.....	(km)	(m)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
.....
Byland	BR 863,3 RO	176	-4	+1	+1
Pannerdense overlaat	PK 869,3 RO	32	-28	+15	+14
Lobberdense leidam	PK 869,1 RO	156	-53	+27	+26
kade over de Pan. Kop	PK 869,3 LO	161	-64	+33	+31
Millingse dam	WL 867,8 LO	171	+16	-7	-7
Suikerdam	WL 871,6 RO	210	+9	-5	-5
Roswaard	PK 870,5+872,0 LO	60 + 64	-4	+5	+4
zomerkade Angeren	PK 872,5 LO	119	-31	+16	+16
Looveerweg	PK 876,9 LO	178	-2	+1	+1
Koningspley	YS 879,9 LO	123	-5	-36	+46
Koppenwaardse dam	YS 885,4 LO	187	-2	-5	+6
Marsweg	YS 887,5 RO	77	-2	-6	+5
Praets	NR 883,8 LO	184	-1	+1	0

De effecten op de afvoerverdeling blijven ook nu weer beperkt tot maximaal enkele tientallen m³/s. Ook een bres in de Pannerdense overlaat heeft maar een klein effect op de afvoerverdeling. Weliswaar neemt de afvoer door de groene rivier met 150 m³/s toe, maar dit gaat vooral ten koste van de afvoer door het zomerbed van het Pannerdens Kanaal. Bij de Looveerweg is het effect zo gering omdat een bres is gemaakt in een gedeelte waar de kade niet maximaal stroomvoerend is. De Millingse dam heeft in het model een hoogte van 14,70 m+NAP, wat slechts enkele decimeters boven maaiveld is. In zijn algemeenheid zal het effect met Tabel 9 enigszins onderschat worden, omdat de ontgrondingskuil die altijd met een bres in een dijk of kade gepaard gaat, in de berekeningen niet is meegenomen. Een dergelijke ontgrondingskuil vergroot de afvoercapaciteit van de bres. Een tweede algemene opmerking is dat kades die in serie liggen elkaars taak deels kunnen overnemen bij het falen van een van beide. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de Koppenwaardse dam en de Marsweg langs de IJssel. Kades in serie zijn dus veiliger dan individuele kades. De waarden uit Tabel 9 zijn veel kleiner dan die uit lit. 28, waar het regelbereik in de afvoerverdeling van kades en overlaten is verkend. Het verschil is waarschijnlijk voor een deel terug te voeren op het feit dat het oude WAQUA-model een fout in de overlaatformulering bevatte die in het nu gebruikte model verbeterd is. Daarnaast zijn in de studie naar het regelbereik de kades over de volle lengte sterk verlaagd of volledig weggehaald, terwijl er nu alleen een relatief klein gat in gemaakt wordt. Als een kade dan niet haaks aangestroomd wordt (bv. de Koppenwaardse dam), dan geeft een bres weinig verstoring van het stroombeeld.

3.7 Veranderingen in de riviergeometrie

De Maatgevende Hoogwaterstanden worden om de 5 jaar vastgesteld, met in principe de riviergeometrie zoals die op dat moment is. Indien zich een MHW-golf voordoet op een moment dat de laatste vaststelling van de MHW bijna 5 jaar geleden is, kunnen zich in de tussentijd veranderingen in de riviergeometrie hebben voorgedaan. Afgezien van menselijk ingrijpen, verandert de riviergeometrie door morfologische processen in het zomerbed (erosie/aanzanding) en het winterbed (aanslibbing). Met WAQUA is

onderzocht wat het effect is van veranderingen in de ligging van het zomerbed op de afvoerverdeling. De WAQUA-schematisatie waarmee de MHW-standen voor het Randvoorwaardenboek 2001 (HR2001) zijn berekend bevatte de bodemligging uit 1997 (Nederrijn: 1995). Voor het Randvoorwaardenboek 1996 (HR1996) is de bodemligging uit begin jaren 80 gebruikt, en vergelijking met HR2001 geeft dus geen goed beeld van de veranderingen in een vijfjaarlijkse periode. Daarom is het effect op de afvoerverdeling bepaald met de zomerbedbodem uit 1993, zie Tabel 10. Opgemerkt wordt dat de in Tabel 10 vermelde verandering in bodemligging (afgerond op 0,05 m) meetonauwkeurigheden bevat, en daarom nogal fors uitvalt.

Tabel 10 Effect van de zomerbedbodem op de afvoerverdeling tussen 1993 en 1997.

riviertak	afvoereffect WAQUA (m ³ /s)	verandering bodemligging tussen 1993 en 1997 (m)	beschouwde traject bodemligging
Waal	+14	-0,10	Pan. Kop – Nijmegen
Pannerdens Kanaal	-20	-0,15	Pan. Kop – IJsselkop
Nederrijn	-29	+0,20	IJsselkop – Driel
IJssel	+16	+0,10	IJsselkop – Dieren

Hoewel de laatste jaren een afvlakking lijkt op te treden, bedroeg de autonome bodemdaling in het bovenrivierengebied lange tijd ca. 0,02 m/jaar. Daarom is in aanvulling op Tabel 10 met Sobek onderzocht wat het effect op de afvoerverdeling is van een bodemdaling van 0,10 m in 5 jaar in de bovenloop van één van de takken, zie Tabel 11. Het grootste effect treedt op als slechts één tak aan daling onderhevig is. Als op alle trajecten bodemdaling optreedt dan compenseren de takken elkaar voor een groot deel.

Tabel 11 Effect van 0,10 m daling van de hoogte van het zomerbed.

riviertak	traject met bodemdaling	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
Waal	Pan. Kop – Nijmegen	+44	-23	-22
Pannerdens Kanaal	Pan. Kop – IJsselkop	-48	+25	+23
Nederrijn	IJsselkop – Driel	-13	+36	-23
IJssel	IJsselkop – Dieren	-15	-30	+45
	cumulatief	-32	+8	+24

Aanslibbing van de uiterwaarden over een periode van 5 jaar ligt in de orde van enkele millimeters. Het effect op de afvoerverdeling zal daarom een factor kleiner zijn dan bij veranderingen in de hoogte van de zomerbedbodem. Vanwege dit geringe effect is aanslibbing van de uiterwaarden niet verder onderzocht.

3.8 Hydraulische ruwheid

Een parameter die zeer bepalend is voor de afvoerverdeling is de hydraulische ruwheid van zomerbed en uiterwaard. De ruwheid wordt gebruikt om modellen te calibreren door de C-waarde of de k-waarde binnen realistische grenzen te variëren. De ruwheid is een functie van de structuur van de bodem en van de waterdiepte. De modellen in Sobek en WAQUA worden voor het hoge afvoerbereik afgeregeld op hoogwaters, waaronder die van 1993 en 1995. Hieruit volgt meteen dat de onzekerheid omtrent de ruwheid minder groot is dan op het eerste gezicht lijkt. Als het model goed is gecalibreerd op het hoogwater van 1995, dan wordt onzekerheid geïntroduceerd door de extrapolatie van het afvoerniveau van 12.000 m³/s (HW 1995) naar 16.000

m³/s (MHW). Dit verschil in afvoer komt overeen met een waterdiepte van ongeveer 1 meter, wat op een diepte in het zomerbed van meer dan 10 meter relatief gering is, en waardoor ook de onzekerheid in de extrapolatie van de ruwheid beperkt is. In de uiterwaard is de waterdiepte kleiner, en is de onzekerheid in de extrapolatie van de ruwheid dus groter. Naast de onzekerheid in de extrapolatie van de ruwheid, wordt nog onzekerheid geïntroduceerd doordat onbekend is hoe de duinen op de rivierbodem zich tijdens MHW zullen ontwikkelen.

Voor een aantal onzekerheden in de ruwheid is het effect op de afvoerverdeling berekend met WAQUA, zie Tabel 12. De eerste twee berekeningen uit de tabel zijn ontleend aan lit. 1, de overige berekeningen zijn in het kader van dit project uitgevoerd.

Tabel 12 WAQUA-berekeningen met aangepaste ruwheid.

maatregel	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
ruwheden zomerbed HR2001 vervangen door HR1996	+44	+49	-86
lagere ruwheid productiegrasland	-4	+13	-8
ruwheid zomerbed Waal verhoogd naar k=0,4 m	-79	+41	+39
ruigte omgezet in struweel	-25	+4	+20

Ruwheden zomerbed HR2001 vervangen door ruwheden HR1996

Een indruk van de vrijheid die bestaat bij het calibreren van de ruwheid, ontstaat door de k-waarden van het zomerbed die gebruikt zijn voor HR2001 (situatie 1997) te vervangen door die welke gebruikt zijn voor HR1996 (situatie eind jaren 80). Op de bovenloop van alle takken zijn de ruwheden nu lager dan destijds. Met name op de IJssel is het verschil in ruwheid zeer groot, wat ook tot uitdrukking komt in het effect op de afvoerverdeling.

Lagere ruwheid productiegrasland

Bij HR1996 werd voor productiegrasland een ruwheid van k=0,20 m aangenomen, en bij HR2001 een waarde van k=0,29 m. Omdat veel van de uiterwaarden langs de Rijn bestaan uit productiegrasland, kan een wijziging in de ruwheid dan ook van grote invloed zijn op de afvoerverdeling. In werkelijkheid blijkt dat wel mee te vallen, omdat de verstoringen door de verschillende takken elkaar grotendeels compenseren.

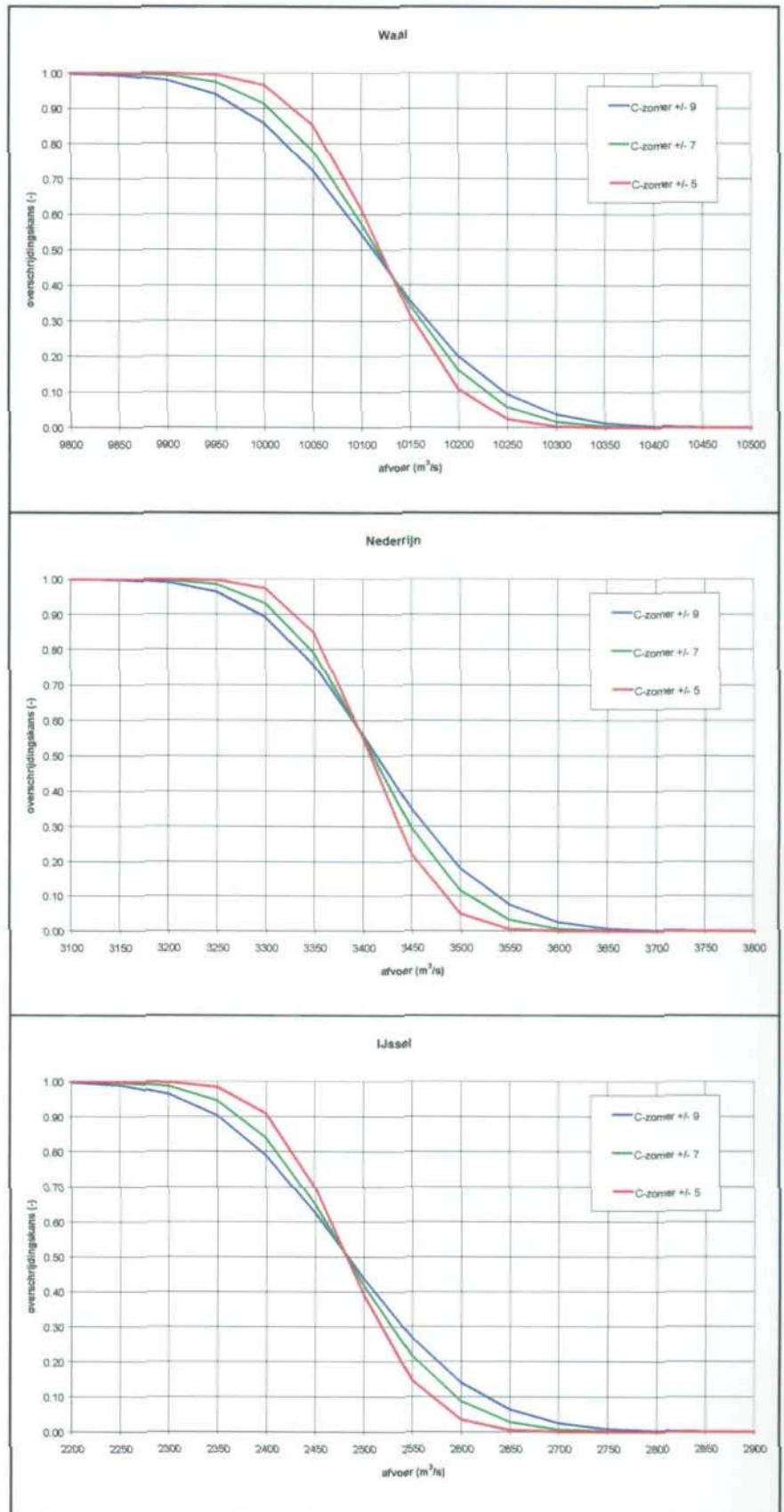
Ruwheid zomerbed Waal verhoogd naar k=0,4 m

In de MHW-berekeningen is aangenomen dat er tijdens MHW duinen op de rivierbodem voorkomen. Door iets grotere, maar nog wel realistische duinen aan te nemen, wordt de ruwheid van het zomerbed groter en verandert de afvoerverdeling. Omdat verwacht wordt dat het effect het grootst is op de Waal, is alleen daar de ruwheid verhoogd van orde 0,20 m naar 0,40 m. Als gevolg hiervan gaat er 79 m³/s minder naar de Waal. Dit is een conservatieve schatting, omdat er nu geen compensatie is door toegenomen zomerbedruwheid als gevolg van duinvorming op het Pannerdens Kanaal.

Ruigte omgezet in struweel

Ook een goed geijkt model veroudert en geeft dan geen goede beschrijving meer van de werkelijkheid. Een van de oorzaken van veroudering is het veranderen van de vegetatie, en daarmee van de ruwheid, in de uiterwaard. Om dit te onderzoeken is alle ruigte in de uiterwaarden omgezet in struweel. Het netto effect op de afvoerverdeling is relatief beperkt, omdat langs alle riviertakken wel struweel voorkomt, en de verstoringen elkaar compenseren.

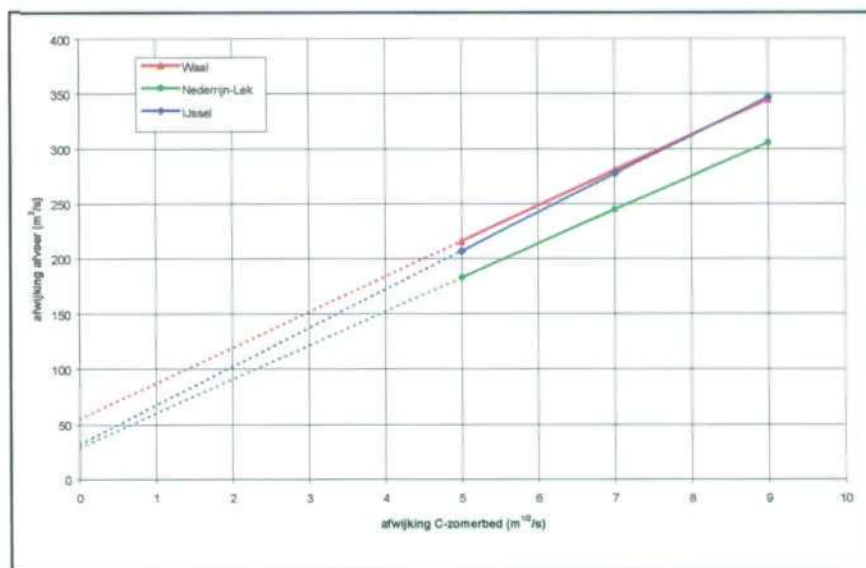
Figuur 22 Overschrijdingskansen afvoer bij onzekerheid in de zomerbedruwheid.



In lit. 7 worden de Maatgevende Hoogwaterstanden en de bijbehorende afvoerverdeling op een stochastische manier benaderd. De ruwheden en hoogteligging van zomerbed en winterbed worden niet als vaste waarden beschouwd, maar aan deze parameters worden kansverdelingen toegekend. Vervolgens wordt in een Monte Carlosimulatie voor iedere parameter per deeltraject een waarde getrokken en ingevoerd in een Sobekschematisatie. Door deze procedure 2.000 keer te herhalen verkrijgt men even zovele waarnemingen voor de waterstanden en de afvoerverdeling. Die kunnen dan weer uitgedrukt worden in overschrijdingskansen, zie Figuur 22.

De resultaten van de Monte Carlosimulatie hangen sterk af van de grootte van de onzekerheid die men aanneemt. In lit. 7 wordt hieraan invulling gegeven door een enquête onder experts en literatuuronderzoek. De onzekerheid in de ruwheid van het zomerbed wordt voor alle takken benedenstreams van de Pannerdense Kop geschat op $x_{95\%} - x_{50\%} = x_{50\%} - x_{5\%} = 9 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, dus met een 90%-betrouwbaarheidsinterval van $18 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Daarnaast is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor onzekerheden van $7 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en $5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. In Figuur 23 is het 90%-betrouwbaarheidsinterval voor de afvoerverdeling uitgezet als functie van de onzekerheid in de ruwheid van het zomerbed.

Figuur 23 Zomerbedruwheid en afvoerverdeling. Het 90%-interval van de afwijking in de afvoerverdeling als functie van onzekerheid in zomerbedruwheid.



Het valt op dat het betrouwbaarheidsinterval voor alle drie de takken in dezelfde orde van grootte ligt. Omdat de Nederrijn en de IJssel hebben te maken hebben met onzekerheden in de afvoerverdeling van zowel Pannerdense Kop en IJsselkop, is het interval voor deze takken *relatief groot* in verhouding tot de gemiddelde MHW-afvoer van de betreffende tak. Verder zijn de 90%-betrouwbaarheidsintervallen in de afvoer erg groot, in de orde van enkele honderden m³/s, maar de grootte van het interval neemt snel af als de onzekerheid in de ruwheid afneemt. Overwegende dat de gemiddelde zomerbedruwheid in de orde van $45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ligt, lijkt een 90%-betrouwbaarheidsinterval van $18 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ($\pm 9 \text{ m}^{1/2}$) aan de hoge kant. Zoals eerder in deze paragraaf is gesteld, is het verschil in waterstand tussen het calibratiehoogwater van 1995 en MHW niet erg groot, en kan dus ook de ruwheid niet zo sterk variëren. Een 90%-betrouwbaarheidsinterval van $10 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ ($\pm 5 \text{ m}^{1/2}$) ligt meer voor de hand, zodat het 90%-betrouwbaarheidsinterval van de afvoerverdeling voor alle drie de takken op

ca. 200 m³/s (± 100 m³/s) ligt. Lineair extrapolerend naar een onzekerheid in de zomerbedruwheid van 0 m^{1/2}/s, blijft voor de afvoer een 90%-betrouwbaarheidsinterval over in de orde van 50 m³/s (± 25 m³/s), veroorzaakt door onzekerheden in de bodemligging van zomerbed en uiterwaard, en de ruwheid van de uiterwaard. Het 90%-betrouwbaarheidsinterval voor alleen de zomerbedruwheid komt in deze benadering dus uit op 200 - 50 = 150 m³/s (± 75 m³/s). Kennelijk is de onzekerheid in de zomerbedruwheid zeer bepalend voor de totale onzekerheid in de afvoerverdeling, zoals ook al bleek uit Tabel 12.

In lit. 20 is onder meer het effect op de afvoerverdeling berekend wanneer van een tak de k-waarde van de uiterwaard 50% hoger of lager uitvalt, zie Tabel 13. Om de gedachten te bepalen: de geijkte k-waarde in Sobek ligt in de orde van 0,45 m, wat bij een waterdiepte in de uiterwaard van ca. 3 m een C-waarde oplevert van 34 m^{1/2}/s. Een 50% kleinere of grotere k-waarde geeft C-waarden van resp. 40 en 31 m^{1/2}/s. Wanneer de ruwheid van één tak wordt aangepast is het effect aanzienlijk, tot meer dan 100 m³/s, maar het gezamenlijk effect blijft beperkt tot enkele tientallen m³/s.

Tabel 13 Effect van + of - 50% verandering in k-waarde uiterwaard.

tak met aangepast ruwheid	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
Waal	-112 / +139	-72 / +58	-67 / +53
Pannerdens 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

3.9 Gebruikte modelparameters

Per definitie is een model een benadering van een deel van de werkelijkheid. Bij het schematiseren van de rivier in een model als WAQUA worden keuzes gemaakt en aannamen gedaan die het uiteindelijke resultaat kunnen beïnvloeden. Een parameter waarvan verwacht wordt dat deze van grote invloed is, is de overlaatcoëfficiënt. Deze wordt in WAQUA modelbreed opgegeven, waarbij nog wel onderscheid wordt gemaakt tussen kribben en overlaten, en staat default op m=1,0. Om het effect op de afvoerverdeling te onderzoeken zijn de overlaatcoëfficiënten gevarieerd tussen m=0,8 en m=1,2. Er is niet gepoogd via een omweg de overlaatcoëfficiënten per riviertak te variëren in plaats van modelbreed, omdat het niet aannemelijk is dat de coëfficiënten op de ene riviertak systematisch hoger of lager zijn dan op de andere⁶. Het effect op de afvoerverdeling staat in Tabel 14.

Tabel 14 Afvoereffect van de overlaatcoëfficiënt.

parameter	waarde	Waal (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
kribcoëfficiënt	0,8	+24	-7	-14
kribcoëfficiënt	1,2	-20	+7	+14
overlaatcoëfficiënt	0,8	-32	+10	+21
overlaatcoëfficiënt	1,2	+35	-12	-20

⁶ Het eventueel variëren van de overlaatcoëfficiënt per riviertak kan gedaan worden door te rekenen met deelmodellen van één tak. Omdat met deelmodellen het effect op de afvoerverdeling niet rechtstreeks is te berekenen, moet achteraf een vereffening plaatsvinden. In bijlage 1 is een hulpmiddel afgeleid waarmee deze vereffening kan worden uitgevoerd.

Een lagere coëfficiënt betekent een lagere weerstand. Omdat langs de bovenloop van de Waal meer kribben liggen dan langs het Pannerdens Kanaal, zorgt het verlagen van de kribcoëfficiënt voor meer afvoer naar de Waal. Na correctie voor de afgenomen afvoer via het Pannerdens Kanaal trekt de Nederrijn relatief iets meer na het verlagen van de kribcoëfficiënt. Het verlagen van de overlaatcoëfficiënt zorgt voor meer water naar het Pannerdens Kanaal, met name omdat de Pannerdense overlaat minder weerstand biedt. Net als bij het falen van overlaten (Tabel 9) wordt de toename van de afvoer over de Pannerdense overlaat echter voor het grootste deel gecompenseerd door de afname van de zomerbedafvoer van het Pannerdens Kanaal. Bij de IJsselkop trekt de Nederrijn iets minder afvoer na het verlagen van de overlaatcoëfficiënt.

3.10 Synthese

In dit hoofdstuk is per onzekerheidsbron een schatting gemaakt van het effect op de afvoerverdeling. Een voor de hand liggende vraag is dan hoe groot nu de totale onzekerheid in de afvoerverdeling is. Om hier meer inzicht in te krijgen is voor elk van de drie Rijntakken een 'worst case'-benadering gevolgd: per tak is aangenomen dat alle onzekerheidsbronnen tegelijkertijd hun maximale bijdrage leveren (Tabel 15) voor zowel een afvoertoeename als een afvoerafname. Uit de tabel blijkt dat voor Waal, Nederrijn en IJssel de maximale toename in de orde van 400 m³/s ligt. Omdat de maximale afname voor de Waal 600 m³/s bedraagt, is de maximale toename voor het Pannerdens Kanaal eveneens 600 m³/s. Vooral de ruwheid van zomerbed en uiterwaard en de morfodynamiek tijdens MHW leveren flinke bijdragen. Zijdelingse toestroming heeft in vergelijking tot de andere bronnen een verwaarloosbaar effect, en het effect van de overige bronnen ligt in de orde van enkele tientallen m³/s.

De waarden in Tabel 15 zijn extremen. Het is echter niet waarschijnlijk dat alle onzekerheidsbronnen tegelijkertijd hun maximale bijdrage leveren. In een aantal gevallen (golfvorm, morfodynamiek, ...) zal de onzekerheid per bron minder extreem uitpakken, en ook zullen de bronnen elkaar voor een deel compenseren. De werkelijke onzekerheid in de afvoerverdeling zal dus eerder in de orde van 200 à 300 m³/s per tak liggen.

Tabel 15 Samenvatting afvoereffecten.

onzekerheidsbron	Waal		Nederrijn		IJssel	
	min. (m ³ /s)	max. (m ³ /s)	min. (m ³ /s)	max. (m ³ /s)	min. (m ³ /s)	max. (m ³ /s)
wind	-41	+20	-19	+10	-25	+52
zijdelingse toestroming	-3	+3	-3	+3	-5	+5
golfvorm	-5	+9	-44	+14	-55	+20
morfodynamiek tijdens MHW	-168	-28	+20	+133	+8	+35
retentiegebieden	-63	+73	-38	+33	-35	+30
falen van kades en overlaten	-64	+16	-36	+33	-7	+46
veranderingen riviergeometrie	-44	+44	-36	+36	-45	+45
hydraulische ruwheid zomerbed	-75	+75	-75	+75	-75	+75
uiterwaard	-116	+139	-72	+87	-67	+55
gebruikte modelparameters	-32	+35	-12	+10	-20	+21
TOTAAL	-611	+386	-315	+434	-326	+384

De omstandigheden waaronder een onzekerheidsbron zijn maximale bijdrage levert aan de verstoring van de afvoer zijn voor elke tak anders. Per

onzekerheidsbron is de som over de takken van een effect dan ook niet gelijk aan nul. Meer specifiek worden bij Tabel 15 de volgende opmerkingen geplaatst:

- De maximale toename door 'wind' treedt voor de Waal op bij NO-wind, voor het Pannerdens Kanaal bij ZW-wind, voor de Nederrijn bij O-wind, en voor de IJssel bij WZW-wind.
- Bij smalle golven kan de Waalafvoer toenemen, maar het effect op de MHW-standen langs de Waal zal beperkt zijn dankzij de toegenomen topvervlakking.
- De bronnen 'golfvorm' en 'morfodynamiek tijdens MHW' moeten altijd in samenhang beschouwd worden, omdat in beide de breedte van de golf een rol speelt. Daarom is bijvoorbeeld in de kolom met de minimumafvoer voor de Nederrijn de bijdrage van 'morfodynamiek tijdens MHW' positief. Tezamen met 'golfvorm' is het netto resultaat echter negatief.
- Zolang er nog geen retentiegebieden zijn aangelegd, zijn dit ook nog geen bronnen van onzekerheid.
- Bij 'falen van kades en overlaten' is aangenomen dat slechts één constructie faalt, en niet een aantal constructies waardoor een versterkend of compenserend effect zou ontstaan. Eveneens om compensatie te vermijden is bij 'veranderingen riviergeometrie' en 'hydraulische ruwheid uiterwaard' aangenomen dat slechts op één tak veranderingen optreden, en bij 'gebruikte modelparameters' is alleen naar het effect van de overlaatcoëfficiënt gekeken en niet ook naar het effect van de kribcoëfficiënt.

Een vervolgvraag is of het zinvol is om over operationele regelwerken te beschikken waarmee de afwijkingen in de afvoerverdeling als gevolg van bovenstaande onzekerheidsbronnen gecorrigeerd kunnen worden. Stel dat de totale onzekerheid 200 m³/s bedraagt, dan is er niets aan de hand zolang de totale afvoer minder is dan 15.800 m³/s. Als de afvoer eenmaal een niveau van 15.800 m³/s heeft bereikt, dan is echter de kans groot dat ook een niveau van 16.200 m³/s wel wordt bereikt, en dan hoeft er niet meer bijgeregeld worden, omdat dan op minstens één tak de MHW-standen al zijn overschreden. Een regelwerk voor het opvangen van onzekerheden in de afvoerverdeling heeft dus maar een klein operationeel venster. Dit laat overigens onverlet dat sturing van de afvoer om andere redenen nog wel zin kan hebben, bijvoorbeeld als zich een afvoergolf van 18.000 m³/s aandient en men ervoor kiest langs één tak overschrijding van de MHW-standen te accepteren, liever dan langs alle drie de takken. Het regelbereik van de sturingsmiddelen moet daar dan echter wel groot genoeg voor zijn.

In dit rapport zijn de onzekerheden in de afvoerverdeling onderzocht bij een MHW-afvoer van 16.000 m³/s. Als de MHW-afvoer in de toekomst mocht toenemen tot 18.000 m³/s, hoe zou de onzekerheid in de afvoerverdeling dan veranderen? De waterstanden liggen bij 18.000 m³/s ca. 0,50 m hoger dan bij 16.000 m³/s, dus voor alle bronnen waar de waterdiepte een rol speelt neemt het effect af. Dit geldt voor de bronnen 'wind', 'falen van kades en overlaten', en 'veranderingen riviergeometrie'. Het aandeel van de uiterwaard in de totale afvoer neemt toe, en omdat de onzekerheid in de hydraulische ruwheid van de uiterwaard groter is dan die van het zomerbed, neemt ook de onzekerheid in de afvoerverdeling over de splitsingspunten toe. Verwacht wordt dat het netto effect van een hogere MHW-afvoer op de onzekerheid in de afvoerverdeling beperkt zal zijn, en dat de in dit rapport gepresenteerde resultaten bij benadering ook voor andere extreme hoogwatergolven van toepassing zijn.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

In dit rapport is onderzocht hoe groot bij MHW de onzekerheden in de afvoerverdeling zijn als gevolg van:

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 vullen van retentiebekkens tijdens MHW.
6. Het falen van kades en overlaten tijdens MHW.
7. Veranderingen in de riviergeometrie gedurende de 5-jaarlijkse periode tussen de vaststelling van de MHW-standen.
8. Formulering van de hydraulische ruwheid en de extrapolatie daarvan naar MHW-omstandigheden.
9. Gebruikte modelparameters.

Op grond van deze studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Van de onderzochte onzekerheidsbronnen blijken de hydraulische ruwheid van zomerbed en uiterwaard en de morfodynamiek tijdens MHW de grootste bijdragen te leveren (orde $100 \text{ m}^3/\text{s}$ per bron). Zijdelingse toestroming heeft een te verwaarlozen invloed, en de overige bronnen leveren bijdragen in de orde van enkele tientallen m^3/s per bron.
- Een 'worst case'-benadering, waarbij voor elke tak de maximale bijdragen per bron zijn gesommeerd, levert voor Waal, Nederrijn en IJssel een toename van $400 \text{ m}^3/\text{s}$ en voor het Pannerdens Kanaal een toename van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie Tabel 15). Omdat het echter niet waarschijnlijk is dat alle bronnen tegelijk hun maximale bijdrage leveren, en omdat de bronnen elkaar deels zullen compenseren, zijn waarden van resp. 200 en $300 \text{ m}^3/\text{s}$ realistischer.

4.2 Aanbevelingen

Een berekend effect op de afvoerverdeling heeft meer waarde als ook wordt *aangegeven hoe groot de kans is dat dit effect optreedt*. Daarom wordt aanbevolen om een onderzoek uit te voeren waarin de onzekerheidsbronnen volledig probabilistisch benaderd worden. Een tweede onderzoekslijn zou kunnen zijn een nadere verkenning naar de mogelijkheden van operationeel regelen. Welke technische voorzieningen zijn hiervoor nodig, is de informatievoorziening toereikend, hoe zit het met verantwoordelijkheden?

Referenties

1. Brink, N.G.M. van den, D. Beyer, M.J.M. Scholten, E.H. van Velzen, (2002),
'Onderbouwing hydraulische randvoorwaarden 2001 voor de Rijn en zijn takken'. RWS/RIZA, RIZA rapport (in prep.).
2. Boiten, W. (1983),
'Overlaat in de Groene Rivier te Pannerden : vaststellen van de afvoerbetrekking : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 1905.
3. Boom, O.H., K. van Til (1949),
'Verbetering van het Pannerdens Kanaal : al of niet verruiming van de Boven-Waal'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota S 551/P R2.
4. Brolsma, P., H. van Zanten, J.J. van der Zwaard (1976),
'Berekening van niet-permanente zandtransportverschijnselen rond de Pannerdense Kop : verslag wiskundig onderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport W 133.
5. Dijkman, J.P.M. (1999),
'Structuur onderzoek'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, RWS/DON, RVR-rapport 99.03.
6. Dijkman, J.P.M. (red) (1999),
'Aanvullende analyses'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, RWS/DON, RVR-rapport 99.07.
7. Duits, M.T., J.M. van Noortwijk (1999),
'Nauwkeurigheidsanalyse Ruimte voor Rijntakken'. HKV Lijn in water, rapport PR163.
8. Filarski, R. (1969),
'Pannerdens Kanaal : morfologische gevolgen van extreem hoogwater : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport W 30-1.
9. Filarski, R., J.J. van der Zwaard (1981),
'Splittingspunt Pannerdense Kop : verdeling van het sedimenttransport bij het splitsingspunt : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 932.
10. Henket, N.H., E. Steuerwald, J. van der Toorn, Ch. M. Schols (1880),
'Waterbouwkunde : tweede deel : XI rivieren en rivierwerken'. Van Cleef.
11. Henket, N.H., Ch. M. Schols, J.M. Telders (1890),
'Platen behorende bij waterbouwkunde : tweede deel : XI rivieren en rivierwerken'. Van Cleef.
12. Jansen, J. (1967),
'Verhangwaarnemingen rond het splitsingspunt Pannerdense Kop'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 67.13.

-
13. Jansen, J. (1967),
'Bodembemonstering rondom de Pannerdense Kop'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 67.14.
 14. Jesse, P., D.F. Kroekenstoel (2001),
'1-D morfologisch model Rijntakken : Verslag calibratie en validatie'. RWS/RIZA, RIZA rapport 2001.040.
 15. Kok, M., N. Douben, J.M. van Noortwijk, W. Silva (1996),
'Integrale Verkenning Rijntakken : veiligheid'. Waterloopkundig Laboratorium, RWS/RIZA, HKV Lijn in Water, IVR-rapport 12.
 16. Klopstra, D., M. Duits (1999),
'Methodiek voor vaststelling van de vorm van de maatgevende afvoergolf van de Rijn bij Lobith'. HKV Lijn in Water, rapport PR204.
 17. Lee, W.T.B. van der, M. Visser, K. Wouters (2001),
'WAQUA berekeningen ten behoeve van afvoerstatistiek'. HKV Lijn in water, rapport PR392. (in prep.).
 18. Lely, C. W. (1910),
'Eenige opmerkingen over de waterverdeling op onze Boven-rivieren'. In 'De Ingenieur' van 16 Juli 1910, No. 29.
 19. Most, H. van der (2000),
'Afvoerverdeling van de Rijn bij hoge afvoeren : de samenhang nader verkend : onderzoek thema 2 WB21'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, Alterra.
 20. Oosting, D.H. (2001),
'Een zekere onzekerheid? : een onderzoek naar de invloed van onzekerheden in ruwheid op de overschrijdingskans van de maatgevende hoogwaterstanden op de Rijntakken en de mogelijkheden om met noodoverloopgebieden deze onzekerheden te ondervangen'. RWS/RIZA, RIZA werkdocument 2001.082X.
 21. Petersen, J.W. van (1978),
'De waterplaag : dijkdoorbraken en overstromingen achter Rijn en IJssel'. De Walburg Pers, Zutphen.
 22. Ploeger, B. (1992),
'Bouwen aan de Rijn'. RWS/Directie Gelderland, rapport 53.
 23. Rijkswaterstaat (1969),
'Afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop tijdens extreem hoogwater'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 69.3.
 24. Rijkswaterstaat (1969),
'Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-IJssel en de invloed daarvan op waterstanden en afvoeren voor en na Rijnkanalisatie'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 69.7.
 25. Rijkswaterstaat (1971),
'Noodzakelijke werken langs Pannerdensch Kanaal en/of boven-IJssel ter voorkoming van een ongewenste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop t.g.v. verbeteringswerken aan de Waal'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 71.4.

-
26. Rijkswaterstaat (1988),
'Voordrachten gehouden tijdens de TOW-rivierendag 1 december 1987'.
Rijkswaterstaat, Technische Universiteit Delft, Waterloopkundig
Laboratorium.
 27. Schönfeld, J.F. (1940),
'Waar lag – ten tijde der Romeinen – het splitsingspunt van den Rijn?' In:
De Ingenieur, vol. 55, 1940, pag. A. 223-230.
 28. Schropp, M.H.I. (1999),
'Regelbereik afvoerverdeling Rijntakken : een verkenning bij Maatgevend
Hoogwater'. RWS/RIZA, RIZA rapport 99.022.
 29. Schropp, M.H.I. (2000),
'Trends in de afvoerverdeling bij laagwater'. RWS/RIZA, RIZA rapport
99.043.
 30. Silva, W., F. Klijn, J. Dijkman (2000),
'Ruimte voor Rijntakken : wat het onderzoek ons heeft geleerd'.
RWS/RIZA, WL Delft Hydraulics, RIZA-rapport 2000.026/WL-rapport
R3294.
 31. Stijnen, J.W., M. Kok, M.T. Duits (2002),
'Onzekerheidsanalyse hoogwaterbescherming : deel A: Bovenrivieren'.
HKV Lijn in Water, rapport PR464 (in prep.).
 32. Stijnen, J.W., M. Kok, M.T. Duits (2002),
'Onzekerheidsanalyse hoogwaterbescherming : deel B: maatregelen'. HKV
Lijn in Water, rapport PR464 (in prep.).
 33. TAW (1985),
'Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken : deel1:
bovenrivierengebied'. Technische adviescommissie voor de waterkeringen.
 34. Til, K. van (1979),
'De Rijntakken van de bovenrivieren sedert 1600'. Rijkswaterstaat, Directie
Bovenrivieren.
 35. Ubbels, A., G. Blom, A. Dollee, W. Silva, R. Westphal (1999),
'Afvoerverdeling Rijntakken : een verkenning van de mogelijkheden en
effecten van een andere afvoerverdeling onder maatgevende
omstandigheden'. RWS/RIZA, RIZA rapport 99.062.
 36. Veen, R. van der, U. Pakes, L. Schutte (2002),
'Bouw en calibratie Sobek-Rijn : versie 2000.1 t/m 2000.3'. RWS/RIZA,
rapport 2002.039.
 37. Ven, G.P. van de (1976),
'Aan de wieg van Rijkswaterstaat : wordingsgeschiedenis van het
Pannerdens Kanaal'. De Walburg Pers, Zutphen.
 38. Werner, M. (red.) (1999),
'Aanvullende analyses RvR: mogelijkheden voor en effecten van een
andere afvoerverdeling'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, RWS/DON,
RVR-rapport 99.12.
 39. Wijngaarden, H. van (1958),

'Verruiming winterbed Boven-Waal : de invloed hiervan op afvoerverdeling, waterstanden en stroomsnelheden rondom de Pannerdense Kop bij de hoogst bekende Bovenrijnafvoer'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 58.4.

40. Wijngaarden, H. van, J.W. Tops (1959),
'Enige beschouwingen bij de suggestie gedaan in nota 58.4: "Verruiming Boven-Waal", tot aanleg van een verdeelwerk in de Millingse dam'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 59.8.
41. Wijngaarden, H. van (1960),
'De invloed van rivierwerken op het evenwicht van de bodem in de omgeving van de splitsingspunten van de Rijntakken in Nederland'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 60.16.
42. Wijngaarden, H. van (1963),
'Eindrapport Maatgevende hoogwaterstanden langs de Bovenrijn en zijn takken'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 63.6.
43. Wijngaarden, H. van (1964),
'Mogelijke verruiming van het winterbed langs Boven-Waal en Pannerdens Kanaal, afgestemd op de afvoerverdeling bij extreem hoogwater'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 64.4.

Bijlagen

1 Vereffeningsfactoren afvoerverdeling

Bij modelberekeningen met WAQUA en Sobek komt het vaak voor dat effecten van ingrepen alleen met deelmodellen van één tak worden doorgerekend. De gevolgen van de ingreep op de afvoerverdeling kunnen met deze deelmodellen niet worden bepaald, en ook het effect op de waterstanden ter plaatse van de ingreep wordt niet correct weergegeven, omdat in feite *gerekend wordt met een ongewijzigde afvoerverdeling*. Om dit bezwaar te ondervangen zijn in Tabel 16 getallen afgeleid die aangeven hoe de opstuwing op een splitsingspunt, die met een deelmodel is berekend, doorwerkt in de afvoerverdeling en via terugkoppeling op de waterstanden op de splitsingspunten. De getallen zijn langs analytische weg en met ondersteuning van Sobek afgeleid, en zijn geldig voor takafvoeren die overeen komen met 16.000 m³/s bij Lobith. De vergelijkingen die ten grondslag liggen aan Tabel 16 zijn gegeven aan het eind van deze bijlage.

Hoe nu deze tabel te interpreteren? Stel dat op de Waal de ruwheid verhoogd wordt, hetgeen zonder herverdeling van afvoer resulteert in een opstuwing op de Pannerdense Kop van 1 meter. Omdat op het Pannerdens Kanaal en benedenstreams daarvan zonder herverdeling van afvoer de waterstanden constant blijven, ontstaat op de Pannerdense Kop een sprong in de waterstand van 1 meter. Hierdoor zal meer water naar het Pannerdens Kanaal stromen ten koste van de Waal, en zal de waterstand op de Pannerdense Kop gezien vanuit de Waal dalen, en gezien vanuit het Pannerdens Kanaal stijgen. In de tabel is af te lezen waar dit toe leidt: Van de 1 meter opstuwing op de Pannerdense Kop blijft uiteindelijk 0,583 m over, de Waalafvoer neemt met 835 m³/s af, en de afvoer over het Pannerdens Kanaal met eenzelfde hoeveelheid toe. Van deze afvoertoeename op het Pannerdens Kanaal gaat 429 m³/s naar de Nederrijn en 406 m³/s naar de IJssel. Door de afvoertoeename op beide laatste takken neemt de waterstand op de IJsselkop toe met 0,480 m.

Wanneer met een deelmodel van de Nederrijn of de IJssel opstuwing wordt berekend op de IJsselkop, dan werkt deze opstuwing voor 23% door op de Pannerdense Kop. Daardoor verandert ook de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop, wat weer van invloed is op de afvoeren op de Nederrijn en de IJssel.

Tabel 16 Vereffening van afvoer en waterstand.
Het netto effect van 1 meter onverdeelde opstuwing per tak na herverdeling.

gestuwde tak	Pan. Kop (m)	IJsselkop (m)	Waal (m ³ /s)	Pan. Kan. (m ³ /s)	Nederrijn (m ³ /s)	IJssel (m ³ /s)
Waal	+0,583	+0,480	-835	+835	+429	+406
Pan. Kanaal	+0,417	-0,480	+835	-835	-429	-406
Nederrijn	+0,093	+0,406	+187	-187	-531	+344
IJssel	+0,088	+0,385	+177	-177	+344	-521

De getallen zijn gebaseerd op een opstuwing van 1 meter op het betreffende splitsingspunt. Strikt genomen is dit niet correct, omdat bij de afleiding van de getallen verondersteld is dat de waterstandsveranderingen klein zijn ten opzichte van de waterdiepte. De tabel mag dan ook alleen toegepast worden bij waterstandsveranderingen tot enkele decimeters, waarbij de getallen naar evenredigheid omgerekend dienen te worden.

Waal gestuwd

$$\Delta Q_{pk} = \Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{pk}}{dh_{pk}} = (\Delta h_{pkwl} - \Delta h_{pk}) \frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}}$$

$$\frac{\Delta h_{pk}}{\Delta h_{pkwl}} = \left(1 + \frac{\frac{dQ_{pk}}{dh_{pk}}}{\frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{1432}{2000} \right)^{-1} = 0.583$$

$$\Delta Q_{wl} = -\Delta Q_{pk} = -835 \times \Delta h_{pkwl}$$

$$\Delta Q_{pk} = \Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{pk}}{dh_{pk}} = 0.583 \times 1432 \times \Delta h_{pkwl} = 835 \times \Delta h_{pkwl}$$

$$\Delta Q_{nr} = \frac{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \Delta Q_{pk} = \frac{893}{893 + 845} \Delta Q_{pk} = 429 \times \Delta h_{pkwl}$$

$$\Delta Q_{ys} = \frac{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \Delta Q_{pk} = \frac{845}{893 + 845} \Delta Q_{pk} = 406 \times \Delta h_{pkwl}$$

$$\Delta h_{yk} = \frac{\Delta Q_{nr}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}} = \frac{429 \times \Delta h_{pkwl}}{893} = 0.480 \times \Delta h_{pkwl}$$

Pannerdens Kanaal gestuwd

$$\Delta Q_{wl} = \Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}} = (\Delta h_{pkpk} - \Delta h_{pk}) \frac{dQ_{pk}}{dh_{pk}}$$

$$\frac{\Delta h_{pk}}{\Delta h_{pkpk}} = \left(1 + \frac{\frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}}}{\frac{dQ_{pk}}{dh_{pk}}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{2000}{1432} \right)^{-1} = 0.417$$

$$\Delta Q_{wl} = \Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}} = 0.417 \times 2000 \times \Delta h_{pkpk} = 835 \times \Delta h_{pkpk}$$

$$\Delta Q_{pk} = -\Delta Q_{wl} = -835 \times \Delta h_{pkpk}$$

$$\Delta Q_{nr} = \frac{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \cdot \Delta Q_{pk} = \frac{893}{893 + 845} \cdot \Delta Q_{pk} = -429 \times \Delta h_{pkpk}$$

$$\Delta Q_{ys} = \frac{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \cdot \Delta Q_{pk} = \frac{845}{893 + 845} \cdot \Delta Q_{pk} = -406 \times \Delta h_{pkpk}$$

$$\Delta h_{yk} = \frac{\Delta Q_{nr}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}} = \frac{-429 \times \Delta h_{pkpk}}{893} = -0.480 \times \Delta h_{pkpk}$$

Nederrijn gestuwd

Zonder doorwerking naar de Pannerdense Kop:

$$\Delta Q_{ys} = \Delta h_{yk} \cdot \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}} = (\Delta h_{yknr} - \Delta h_{yk}) \cdot \frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}$$

$$\frac{\Delta h_{yk}}{\Delta h_{yknr}} = \left(1 + \frac{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{846}{894} \right)^{-1} = 0.514$$

Met doorwerking naar de Pannerdense Kop:

$$\Delta Q_{ys} = \Delta h_{yk} \cdot \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}} + \Delta Q_{ys}^* = 0.514 \times 846 \times \Delta h_{yknr} + \Delta Q_{ys}^* = 435 \times \Delta h_{yknr} + \Delta Q_{ys}^*$$

$$\Delta h_{pk} = 0.23 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta Q_{pk} = -\Delta Q_{wl} = -\Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}} = -0.23 \times 2000 \times \Delta h_{yk} = -460 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta Q_{ys}^* = \frac{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \cdot \Delta Q_{pk} = \frac{845}{893 + 845} \cdot \Delta Q_{pk} = -224 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta h_{yk} = 0.514 \times \Delta h_{yknr} + \frac{\Delta Q_{ys}^*}{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} = 0.514 \times \Delta h_{yknr} + \frac{-224 \times \Delta h_{yk}}{845}$$

$$\frac{\Delta h_{yk}}{\Delta h_{yknr}} = \frac{0.514}{1 + \frac{224}{845}} = 0.406$$

$$\Delta Q_{nr} = \Delta Q_{pk} - \Delta Q_{ys}$$

IJssel gestuwd

Zonder doorwerking naar de Pannerdense Kop:

$$\Delta Q_{nr} = \Delta h_{yk} \cdot \frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} = (\Delta h_{ykyys} - \Delta h_{yk}) \cdot \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}$$

$$\frac{\Delta h_{yk}}{\Delta h_{ykyys}} = \left(1 + \frac{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{894}{846} \right)^{-1} = 0.486$$

Met doorwerking naar de Pannerdense Kop:

$$\Delta Q_{nr} = \Delta h_{yk} \cdot \frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \Delta Q_{nr}^* = 0.486 \times 894 \times \Delta h_{ykyys} + \Delta Q_{nr}^* = 435 \times \Delta h_{ykyys} + \Delta Q_{nr}^*$$

$$\Delta h_{pk} = 0.23 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta Q_{pk} = -\Delta Q_{wl} = -\Delta h_{pk} \cdot \frac{dQ_{wl}}{dh_{pk}} = -0.23 \times 2000 \times \Delta h_{yk} = -460 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta Q_{nr}^* = \frac{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}} + \frac{dQ_{ys}}{dh_{yk}}} \cdot \Delta Q_{pk} = \frac{893}{893 + 845} \cdot \Delta Q_{pk} = -236 \times \Delta h_{yk}$$

$$\Delta h_{yk} = 0.486 \times \Delta h_{ykyys} + \frac{\Delta Q_{nr}^*}{\frac{dQ_{nr}}{dh_{yk}}} = 0.486 \times \Delta h_{ykyys} + \frac{-236 \times \Delta h_{yk}}{893}$$

$$\frac{\Delta h_{yk}}{\Delta h_{yknr}} = \frac{0.486}{1 + \frac{236}{893}} = 0.385$$

$$\Delta Q_{ys} = \Delta Q_{pk} - \Delta Q_{nr}$$

- ΔQ_{wl} = verandering afvoer Waal.
- ΔQ_{pk} = verandering afvoer Pannerdens Kanaal.
- ΔQ_{nr} = verandering afvoer Nederrijn.
- ΔQ_{ys} = verandering afvoer IJssel.
- Δh_{pkwl} = verandering waterstand Pannerdense Kop door opstuwing Waal, exclusief herverdeling.
- Δh_{pkpk} = verandering waterstand Pannerdense Kop door opstuwing Pannerdens Kanaal, exclusief herverdeling.
- Δh_{yknr} = verandering waterstand IJsselkop door opstuwing Nederrijn, exclusief herverdeling.
- Δh_{ykyys} = verandering waterstand IJsselkop door opstuwing IJssel, exclusief herverdeling.
- Δh_{pk} = verandering waterstand Pannerdense Kop, na herverdeling.
- Δh_{yk} = verandering waterstand IJsselkop, na herverdeling.

2 Literatuuroverzicht splitsingspuntenonderzoek

- Lit. 10 Henket, N.H., E. Steuerwald, J. van der Toorn, Ch. M. Schols (1880), 'Waterbouwkunde : tweede deel : XI rivieren en rivierwerken'. Van Cleef.**
Naslagwerk over de Nederlandse rivieren in de 19^e eeuw, plus theoretische achtergronden. De paragraaf over de afvoerverdeling lijkt erg op lit. 18. Hoewel op het titelblad 1880 staat is het boek jonger, omdat in de tekst verwijzingen staan naar metingen in de jaren 80 van de 19^e eeuw, zie ook aanvulling op p. 505. Mooie quote over de afvoerverdeling in 1745 op p. 240.
- Lit. 11 Henket, N.H., Ch. M. Schols, J.M. Telders (1890), 'Platen behorende bij waterbouwkunde : tweede deel : XI rivieren en rivierwerken'. Van Cleef.**
Hoort bij lit. 10. Mooie platen van onder meer de ontwikkeling van de splitsingspunten in de tijd.
- Lit. 18 Lely, C. W. (1910), 'Eenige opmerkingen over de waterverdeling op onze Boven-rivieren'. In 'De Ingenieur' van 16 Juli 1910, No. 29.**
De in 1745 afgesproken afvoerverdeling van 6/9, 2/9, 1/9 berustte niet enig onderzoek. De Waal en Nederrijn voeren bij lage waterstanden meer af, omdat ze dieper zijn dan de concurrerende tak. Metingen in de 19^e eeuw geven andere verhoudingsgetallen, maar een groot deel van de verschillen is terug te voeren op meetonnauwkeurigheden (5%). Door het samennemen van afvoermetingen over langere perioden zijn enigszins betrouwbare uitspraken te doen. Wanneer de periode 1861-1883 wordt vergeleken met 1884-1908 dan neemt het aandeel van de Waal af. Bij hoge afvoeren treedt de Spijkse overlaat in werking, maar er wordt aannemelijk gemaakt dat dit op de afvoerverdeling van weinig invloed is, vanwege de verhangverkleining op het Pannerdens Kanaal bovenstrooms van Kandia. Voor de Nederrijn is er geen trend in de afvoerverdeling: 1877-1891 meer, en 1892-1908 minder dan 1861-1876. De Nederrijn haalt alleen bij zeer hoge afvoeren een aandeel van 2/9, de IJssel krijgt bij hoge afvoeren veel meer en bij lage afvoeren veel minder dan 1/9.
- Lit. 3 Boom, O.H., K. van Til (1949), 'Verbetering van het Pannerdens Kanaal : al of niet verruiming van de Boven-Waal'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota S 551/P R2.**
Van Bendegom stelde in 1943 drie alternatieven voor ter verruiming van het Pannerdens Kanaal: (A) een bochtafsnijding met een smal winterbed, (B) als A, maar met een ruim winterbed en het sluiten van de Spijkse overlaat, (C) als B, maar met het hoogwatervrij maken van de Huissensche Waarden. De minister kiest in 1946 voor plan B. Onderdeel hiervan is het verruimen van de boven-Waal, waar deze nota een uitwerking van is. Tijdens het hoogwater van 1926 traden in het nauwe gedeelte van het Pannerdens Kanaal rond km 870 grote verhangen op (60 cm/km) en hoge stroomsnelheden (3 m/s). De bodem schuurde plaatselijk tot meer dan 2 m uit. Gelukkig zorgden dijkdoorbraken langs de boven-Waal voor verlichting. Plan B voorzag in een verruiming van het knelpunt, maar een versmalling van het

traject km 870 – Kandia, zodat een gelijkmatig lengteprofiel werd verkregen, en het verval over een groter traject werd uitgesmeerd. Netto resultaat: 27 cm daling bij de Pannerdense Kop voor het hoogwater van 1926, wat nodig was om de afvoertoe name over de Bovenrijn te compenseren door het sluiten van de Spijkse overlaat. Voorwaarde was wel dat ook de boven-Waal verruimd zou worden om 27 cm daling te bewerkstelligen, door het verlagen van de Millingse dam en eventueel de Suikerdam langs de Gendtse Waard. Een probleem is echter wel dat verhoging van de kaden destijds met goedkeuring van Rijkswaterstaat is uitgevoerd (!) De Millingse dam is rond 1920 hoogwatervrij gemaakt, nadat rond 1870 de Millingse overlaat was aangelegd als compensatie voor de winterbedvernuwning veroorzaakt door de aanleg van fort Pannerden (zie ook lit. 34). Deze overlaat bleek echter niet nodig. De nota vervolgt met het doorrekenen van verschillende hoogtes van Millingse dam en Suikerdam, waarvan vele mogelijkheden vanwege de kosten afvallen. Gedeeltelijke verruiming van de Waal en een gewijzigd plan B door het minder diep afgraven van de uiterwaard langs het Pannerdens Kanaal is mogelijk, maar duur. Aanbevolen wordt in plaats van minder diep afgraven dwarskades in de uiterwaard te plaatsen voor extra weerstand. Langs de Bovenrijn treden dan wel hogere waterstanden op, maar de dijken hier zijn al te laag en moeten toch verhoogd worden. Ook op de Niederrhein neemt de waterstand toe (11-17 cm), maar Nederland heeft bij verdrag van 1918 het recht de Spijkse overlaat naar eigen inzicht te sluiten, dus hiervoor hoeft niet gecompenseerd te worden.

- Lit. 39** Wijngaarden, H. van (1958), 'Verruiming winterbed Boven-Waal : de invloed hiervan op afvoerverdeling, waterstanden en stroomsnelheden rondom de Pannerdense Kop bij de hoogst bekende Bovenrijnafvoer'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 58.4.

Bouwt voort op nota 58.2. Stelt dat de verruiming van de boven-Waal wenselijk, zo niet noodzakelijk is. Doel is een grotere Waalafvoer en een verlaging van de waterstanden op de Pannerdense Kop. Het Pannerdens Kanaal wordt zo minder belast. De Millingerwaard en de Gendtsche waard zijn bij hoogwater niet stroomvoerend. Verlagen van de Millingse dam geniet de voorkeur (effectiever, minder bedrijvigheid). Er wordt zover verlaagd (tot 13,80 m+NAP, oorspronkelijke hoogte niet gegeven) dat de inundatiefrequentie van de Millingerwaard niet toeneemt. De Kekerdomse schutdam is daarbij maatgevend met een hoogte van 13,25 m+NAP. Dit levert bij de Pannerdense Kop 38 cm verlaging bij een Waalafvoer van 8.250 m³/s (zonder herverdeling). De sluiting van de Spijkse overlaat leidt tot een hogere afvoeren op de Waal en het Pannerdens Kanaal. Volgens de tekst moet de oude Pannerdense bandijk nog worden afgegraven, dus de Pannerdense overlaat bestaat kennelijk nog niet. Op grond van zandtransportberekeningen wordt uitschuring van het Pannerdens Kanaal verwacht, vooral bij km 870. Wijst op het gevaar dat na verruiming uit de nog uit te voeren MHW-berekeningen (18.000 m³/s) zou kunnen blijken dat het nodig is de Millingse dam juist weer op te hogen. Pleit daarom voor een regelbaar inlaatwerk in de Millingse dam. Het dichthouden van het regelwerk bij hoogwater zou ook aanzanding van de vaargeul voorkomen.

- Lit. 40** Wijngaarden, H. van, J.W. Tops (1959), 'Enige beschouwingen bij de suggestie gedaan in nota 58.4: "Verruiming Boven-Waal", tot aanleg van een verdeelwerk in de Millingse dam'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 59.8.

In Lit. 39 wordt een overzicht gegeven van de waterstanden bij het hoogwater van 1926 na sluiting van de Spijkse overlaat, al of niet met verruiming van de Waal. Afwijkingen tussen optredende en berekende afvoeren en waterstanden zijn echter waarschijnlijk door: (1) verschillen in bodemligging op lange en korte termijn; (2) calamiteiten in het splitsingsgebied zoals dijkdoorbraken of het bezwijken van kades (De Suikerdam is bij de hoogwaters van 1924 en 1926 doorgebroken); (3) onvolkomenheden in de berekeningen zoals aannamen omtrent begroeiing en dus C-waarden, (4) windinvloed. Twee wegen staan open: (A) de omvang van de onzekerheid bepalen en aanvullende werken uitvoeren. Echter, ten aanzien van (1) blijven werken ook in de toekomst noodzakelijk, ten aanzien van (2) is de omvang moeilijk te voorspellen, of (B) de afwijkingen tijdens hoogwater met een regelbaar doorlaatwerk corrigeren. Betwijfeld wordt of men hiervoor tijdens hoogwater voldoende gegevens en overzicht heeft. Op het regelwerk wordt nader ingegaan. Operationele afvoerregeling dient plaats te vinden aan de hand van waterstanden, omdat informatie over afvoeren niet voorhanden is en het bij de veiligheid primair om waterstanden gaat. Vergelijk de optredende waterstanden langs de Rijntakken met de verwachte waarden. Met een regelwerk bij de Pannerdense Kop kan echter niet een afwijking tussen Nederrijn en IJssel worden rechtgetrokken. Geef daarom één tak prioriteit, bijvoorbeeld de betrekkinglijnen tussen Waal en IJssel moeten kloppen. Doe ervaring op in het operationeel beheer met lagere hoogwaters. Het regelwerk is gesitueerd in de bovenloop van de Waal of van het Pannerdens Kanaal. Bij samenvallen van berekende en optredende waarden zou het regelwerk voor de helft geopend moeten zijn. Is het nodig het regelwerk in het Pannerdens Kanaal deels te sluiten, dan neemt het verhang over het Pannerdens Kanaal iets toe. Verwacht wordt toch al dat het Pannerdens Kanaal bij hoogwater uit zal schuren, dus de verwachting is dat het Pannerdens Kanaal meer zal gaan trekken. Een doorlaatwerk in de Millingse dam is gunstiger, omdat verwacht wordt dat er meer kans is dat de Waal minder afvoer krijgt dan berekend, omdat gerekend wordt op uitschuring van het Pannerdens Kanaal bij hoogwater. Een alternatief voor het opvangen van onzekerheden in de afvoerverdeling met een regelwerk, is het verhogen van de veiligheidsnorm op de takken benedenstrooms van het splitsingspunt: bij willekeurige afwijking zou een norm van 1:1.000 voor de Bovenrijn dan bijvoorbeeld 1:1.200 voor de Waal en Pannerdens Kanaal worden en 1:1.400 voor Nederrijn en IJssel. Onzekerheden zijn ook op te vangen met extra overhoogte, maar dit wordt als minder fraai van de hand gewezen. Onzekerheden die gelden voor het hele rivierengebied, bijvoorbeeld een systematische onderschatting van de ruwheid, leiden overal tot hogere waterstanden. Ook dit kan met een regelwerk worden opgevangen door bijvoorbeeld de dijken langs de Waal overhoogte te geven, en meer water langs de Waal te sturen.

Lit. 41 Wijngaarden, H. van (1960), 'De invloed van rivierwerken op het evenwicht van de bodem in de omgeving van de splitsingspunten van de Rijntakken in Nederland'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 60.16.

De Rijnkanalisatie is van invloed op de afvoerverdeling en dus op de sedimentverdeling. Het stuwprogramma is nog onbekend, gedacht wordt aan S250-400. Wat is het effect van het stuwprogramma op de bodemligging rond de splitsingspunten, rekening houdend met de bochtafsnijdingen op de IJssel? Bereken het zandtransporterend vermogen ('sleeptransport') met de vergelijking van Meyer-Peter-Müller, geijkt op transportmetingen rond de splitsingspunten, voor en na de Rijnkanalisatie, voor een droog, nat en een gemiddeld jaar.

Vervolgens wordt op basis van de transportcapaciteit de ideale bodemligging voor de Nederrijn bepaald, waaruit volgt dat de bodem zal moeten worden verdiept. Beschrijft verder modelproeven om de meest geschikte plaats voor 'stuw Arnhem' te bepalen. De bochtafsnijding in de IJssel is niet alleen ten behoeve van de scheepvaart, maar ook om de bodem bij de IJsselkop te verlagen om zo de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop niet te verstoren. Met modelonderzoek wordt de bodemligging rond de IJsselkop na Rijnkanalisatie en stuwprogramma S400 bepaald. De Nederrijn komt omhoog, de IJssel gaat omlaag (iteratief stuwprogramma). Verhaal bevat nogal wat open einden.

Lit. 42 Wijngaarden, H. van (1963), 'Eindrapport Maatgevende hoogwaterstanden langs de Bovenrijn en zijn takken'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 63.6.

In nota 62.2 zijn met stroombaanberekeningen voor 18.000 m³/s de MHW-standen berekend voor het splitsingsgebied. Kort daarna kwamen resultaten beschikbaar verkregen met 'electronische rekenapparatuur', die noopten tot enige aanpassingen aan de stroombaanberekeningen. Er is uitgegaan van de (toenmalige) huidige riviergeometrie, wel rekening houdend met bekende toekomstige wijzigingen, zoals de Rijnkanalisatie en bochtafsnijdingen in de IJssel. De berekende verdeling kwam op Waal 11.250 m³/s, Pannerdens Kanaal 6.750 m³/s, Nederrijn/Lek 3.950 m³/s, IJssel 2.800 m³/s. Geschat wordt wat het effect is van veranderingen in de bodemligging, hetzij grootschalig, hetzij lokaal, op de afvoerverdeling. Aangenomen is dat de variatie in bodemligging maximaal 1 m kan bedragen, met als resultaat: Waal 11.400 m³/s, Pannerdens Kanaal 7.100 m³/s, Nederrijn/Lek 4.200 m³/s, IJssel 3.050 m³/s. Dit worden de maatgevend te stellen afvoeren voor de takken. Omdat deze afvoeren op de splitsingspunten een sluitfout hebben, zijn ook de waterstanden op de splitsingspunten per tak verschillend.

Lit. 43 Wijngaarden, H. van (1964), 'Mogelijke verruiming van het winterbed langs Boven-Waal en Pannerdens Kanaal, afgestemd op de afvoerverdeling bij extreem hoogwater'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 64.4.

De maatgevende afvoer is 18.000 m³/s, maar is de verdeling over de Pannerdense Kop wel voldoende stabiel? Gevreesd wordt voor uitschuring van het Pannerdens Kanaal. Verklein het verhang over het Pannerdens Kanaal door verlaging van de waterstand op de Pannerdense Kop. Dit kan door meer water via de Millingse Waard en de groene rivier van het Pannerdens Kanaal te leiden. De afvoerverdeling mag daarbij niet wijzigen! Onderzoek aan de hand van stroombaanberekeningen in de computer. Maatregelen: verwijderen Pannerdense overlaat en voormalige bandijk, verlaging Kekeerdonse schutdam, afgraven zomerkade tussen steenfabrieken, verlagen Millingse dam. Resultaat: bij 18.000 m³/s op de Pannerdense Kop 15 cm verlaging, de snelheid in het Pannerdens Kanaal daalt van 3,5 naar 2,9 m/s. Extra verruiming van de groene rivier (en de Millingerwaard) levert geen extra verlaging van de snelheid op. Verlaging van de Zorgdijk met 1,40 m heeft geen effect.

Lit. 12 Jansen, J. (1967), 'Verhangwaarnemingen rond het splitsingspunt Pannerdense Kop'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 67.13.

In het kader van de verbetering voor de scheepvaart van het traject Pannerdense Kop – Nijmegen (bochtafsnijdingen) zal een schaalmodel worden gebouwd. Daarvoor dient de relatie tussen afvoer en verhang

bekend te zijn, alsmede de C-waarde. Er zijn rondom het splitsingspunt hulpeilschalen geplaatst, op onderlinge afstanden van 1 à 2 km en waar mogelijk aan beide oevers. Deze werden dagelijkse afgeleze vanaf een meetvaartuig, waarbij de golfslag door scheepvaart erg hinderlijk bleek te zijn. Nachtmetingen waren nauwkeuriger dan dagmetingen. Een volledige meting duurde 2 uur, waardoor de metingen niet zonder meer tot vervallen mochten worden verwerkt. Looptijden zijn te verwaarlozen, was en val niet. Pas bij aggregatie over langere trajecten blijkt dat het verhang over de Bovenrijn toeneemt en dat over Waal en Pannerdens Kanaal nagenoeg gelijk blijft. Geen onderscheid tussen was, val en permanentie. Het gemeten dwarsverhang is niet in overeenstemming met de theorie, naar verluidt omdat de plaatsing van peilschalen in de kribvakken niet representatief is. De berekende C-waarden liggen in het bereik 50 – 60 m^{1/2}/s.

Lit. 13 Jansen, J. (1967), 'Bodembemonstering rondom de Pannerdense Kop'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 67.14.

Bemonsteringscampagne rond het splitsingspunt ten behoeve van modelonderzoek. Monsters op $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ en $\frac{3}{4}$ van de breedte. Twee monsterapparaten (sleepemmers) van $\frac{3}{4}$ kg (bodemmonsternemer) en 2 kg (baggerbeugel), geven hetzelfde resultaat. Griepers werkten niet vanwege uitspoeling. Gaat in op hoe groot een monster minimaal moet zijn, en op de maximale afstand (250 m voor modelonderzoek). Het materiaal op het Pannerdens Kanaal is grover dan op de Waal.

Lit. 8 Filarski, R. (1969), 'Pannerdens Kanaal : morfologische gevolgen van extreem hoogwater : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport W 30-I.

Bij de MHW-berekeningen voor de Rijntakken is aangenomen dat het Pannerdens Kanaal tussen het fort en km 871.825 tijdens het hoogwater 1 m uitschuurt door water dat over de Lobberdensche leidam stroomt. Met een wiskundig model is onderzocht in hoeverre dat reëel is. Het model is geijkt op het hoogwater van 1926 (peilingen van 26/11/1925 en 15/4/1926). Bekeken combinaties: golven A (T=3.000 jaar) en B (2x zo breed), Pannerdens Kanaal wel of niet verruimd, HW1926 gevolgd door golf A, en golf A gevolgd door bedvormende afvoer. Er is gewerkt met een transport van 630 m³/dag bij een bedvormende afvoer van 900 m³/s, en de transportformule van Frijlink. Bij de MHW-berekeningen is een lager transport aangenomen. Aangenomen is dat de bodemhoogte aan de bovenrand constant blijft, het invloedsgebied van de rand is bij de ijking ca. 1 km na 3 maanden. Conclusie: de uitschuring is minder diep en over een korter traject dan in de MHW-berekeningen werd aangenomen. De ontwikkeling in de bodemligging ijlt na: de maximale verdieping treedt op enkele dagen na de top van het hoogwater.

Lit. 23 Rijkswaterstaat (1969), 'Afvoerverdeling op de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop tijdens extreem hoogwater'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 69.3.

Ook hier weer de vrees voor uitschuring van de bovenloop van het Pannerdens Kanaal bij MHW. In nota 63.6 is onderscheid gemaakt tussen evenwichtsafvoeren (18.000 m³/s sluitend verdeeld, de bodem blijft in evenwicht) en maatgevende afvoeren (met een afvoertoeslag op de evenwichtsverdeling om te anticiperen op 1 m uitschuring van de bovenloop, zie bijlage 13. Voor het Pannerdens Kanaal gaat het dan om het traject van fort Panerden tot km 871.825, zie nota 63.6. Nota 64.4 stelt verruiming voor door het verlagen van de Millingse dam, de

Kekerdomse schutdam en het afgraven van de zomerkade tussen de steenfabrieken Klaverland en Kekerdom, het verwijderen van de Pannerdense overlaat en de aangrenzende voormalige bandijk, en het verlagen van de groene rivier. Ook is wel voorgesteld de zomerbedbodem van het Pannerdens Kanaal te verdedigen. In voorliggende nota wordt voor het eerst kwantitatief nagegaan hoe groot de uitschuring tijdens MHW is. De golfvorm is bekend (nota 68.3) en het WL heeft morfologische berekeningen uitgevoerd met (A) de standaardgolf, en (B) een twee keer zo brede golf, en met (1) een niet-verruimd Pannerdens Kanaal, en (2) een verruimd Pannerdens Kanaal. Het model is geijkt op het hoogwater van 1926. In tegenstelling tot wat men tot dan toe dacht schuurt het Pannerdens Kanaal slechts over beperkte lengte uit. Het zandaanbod vanaf de Pannerdense Kop lijkt niet van belang te zijn voor de morfologie vanwege de geringe voortplantingssnelheid van de verstoring die dit oplevert. De bodemveranderingen van het Pannerdens Kanaal worden omgerekend in afvoertoesnames met het volgende resultaat: A1 +65 m³/s, B1 +140 m³/s, A2 +45 m³/s, B2 +95 m³/s. Bij verruiming van Waal en Pannerdens Kanaal gaat het dus eigenlijk maar om een verschil van 65 - 45 = 20 m³/s (golf A). Conclusie: verruiming is zinloos, evenals het vastleggen van de bodem van het Pannerdens Kanaal. Wel is het van belang kribben en strekdammen goed vast te leggen. De evenwichtsafvoeren en maatgevende afvoeren waren: Waal 11.250/11.400 m³/s, Pannerdens Kanaal 6.750/7.100 m³/s, Nederrijn 3.975/4.200 m³/s, IJssel 2.775/3.050 m³/s. In het licht van het bovenstaande (+65 m³/s) zijn de reserves: Waal 150 m³/s, Pan. Kan. 275 m³/s, Nederrijn 175 m³/s, IJssel 250 m³/s. Alles afgerond op 25 m³/s.

Lit. 24 Rijkswaterstaat (1969), 'Ontwikkeling van de bodemligging op de Boven-IJssel en de invloed daarvan op waterstanden en afvoeren voor en na Rijnkanalisatie'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 69.7.

Het stuwprogramma gaat ervan uit dat de bovenloop van de IJssel reeds is uitgeschuurd als gevolg van de bochtafsnijdingen. Dit is echter pas over een aantal jaren het geval. Wat moet in de tussentijd het stuwprogramma zijn? Onderzoek met een morfologische model van de bovenloop van de IJssel naar de bochtafsnijding bij Rheden. De bodemligging bij de bovenrand wordt vastgehouden (1) Geeft de bekende plaatjes van de morfologie van bochtafsnijdingen. Gerekend met sedimenttransporten van 110 (meest waarschijnlijk) en 220 m³/dag. Uit ander modelonderzoek zou blijken dat stuw Driel niet van invloed is op de bodemligging van de boven-IJssel. Gaat uitgebreid in op effecten van combinaties van verschillende stuwprogramma's en wel/niet verdiepte boven-IJssel. Kijkt verder naar het effect van verschillende bodemliggingen van de boven-IJssel op de afvoerdeling bij 18.000 m³/s. Evenwichtswaarden: 11.250/6.750/3.975/2.775 m³/s. Een niet verdiepte bodem geeft een hogere afvoer op Waal en Nederrijn, maar in de maatgevende afvoer zit genoeg reserve: 11.400 resp. 4.200 m³/s. Weinig aandacht voor veranderingen in de sedimentverdeling.

Lit. 25 Rijkswaterstaat (1971), 'Noodzakelijke werken langs Pannerdensch Kanaal en/of boven-IJssel ter voorkoming van een ongewenste afvoerdeling op de Pannerdense Kop t.g.v. verbeteringswerken aan de Waal'. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 71.4.

Verbeteringswerken op de Waal (bochtafsnijdingen, normalisatie midden-Waal) leiden tot een veranderde afvoerdeling. Dit is te

compenseren met maatregelen op de Waal zelf, of op de andere takken. De benodigde verbreding en verdieping van het Pannerdens Kanaal zijn niet eenduidig: er zijn altijd afvoeren waarvoor de verdeling verandert. Mogelijke maatregelen zijn verder bochtafsnijdingen, en het veranderen van de C-waarde. Kijkt vooral naar lagere afvoeren, de verdeling bij hoogwater kan worden gecorrigeerd met winterbedmaatregelen: Koppenwaardse dam (IJssel), weerstand groene rivier Arnhem (Nederrijn), Pannerdense overlaat (Pannerdens Kanaal). In totaal 9 situaties worden doorgerekend. Vaak is onderhoudsbaggerwerk noodzakelijk (tot 93.000 m³/jaar), het zand wordt dan gestort in een van de andere takken. Het gladder maken van de bodem is maar beperkt mogelijk en biedt niet de mogelijkheden die verdiepen biedt. Komt uit op het verdiepen van Pannerdens Kanaal en boven-IJssel.

- Lit. 4** **Brolsma, P., H. van Zanten, J.J. van der Zwaard (1976), 'Berekening van niet-permanente zandtransportverschijnselen rond de Pannerdense Kop : verslag wiskundig onderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport W 133.**
Wat zijn de hydraulische en morfologische effecten bij twee varianten voor bochtafsnijdingen tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen? Hiertoe is een morfologisch rekenmodel opgezet van het splitsingspuntgebied. De sedimentverdeling is ontleend aan lit. 9. De resultaten zijn echter van dezelfde orde als de ijk nauwkeurigheid, dus aanvullende ijking is noodzakelijk. Veel over de bouw van het model, weinig concrete resultaten, niets over hoogwatereffecten.
- Lit. 9** **Filarski, R., J.J. van der Zwaard (1981), 'Splitsingspunt Pannerdense Kop : verdeling van het sedimenttransport bij het splitsingspunt : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 932.**
Rapportage van schaalmodelonderzoek dat in 1966 (!) is gestart. Doel is het vaststellen van de sedimentverdeling als functie van de afvoerverdeling. De vormgeving van het splitsingspunt wordt niet gewijzigd. Het voor de drie takken gelijktijdig reproduceren van de bodemligging is niet gelukt, het reproduceren van de globale uitzeving wel, lokale uitzeving echter niet. Voor Bovenrijnafvoeren van 1.500, 2.100 en 2.300 m³/s is een eenduidig verband gevonden tussen de afvoer en de sedimentverdeling: $S=3Q-3$. De afvoerverdeling wordt ingesteld met kleppen aan de benedenranden van het model. Veel schaalproblemen. De kern van het verhaal is figuur 399.
- Lit. 2** **Boiten, W. (1983), 'Overlaat in de Groene Rivier te Pannerden : vaststellen van de afvoerbetrekking : verslag modelonderzoek'. Waterloopkundig Laboratorium, rapport M 1905.**
De overlaat kan afvoeren verwerken tot 800 m³/s, er zijn in 1980 afvoermetingen uitgevoerd voor het bereik 115 - 250 m³/s. De kruin van de overlaat loopt naar de rechteroever 0,60 m op om hoge stroomsnelheden bij de bandijk te vermijden. De kruinhoogte is 13,98 m+NAP en de overlaat treedt in werking bij 15,00 m+NAP te Lobith. De afvoerende breedte is 108,40 m. Tijdens het hoogwater van 1970 werd bekleding van zuilenbasalt beschadigd. Vervolgens werd het benedenstroomse profiel gewijzigd en vastgelegd door grind met cementmortel. Voor het bepalen van de afvoerbetrekking is gewerkt met een tweedimensionaal model (n=1 en n=2) voor het lage bereik en een driedimensionaal model (n=35) voor het hoge bereik. De afvoercoëfficiënt C_d (ongestuwd) in het lage bereik varieert tussen 0,92 en 1,14. Voor het hoge bereik is er een empirische relatie, met een eveneens empirische reductiefactor voor gestuwde afvoer. De

betrouwbaarheid wordt gesteld op 3% ongestuwd en 5% gestuwd, ofwel 40 m³/s, mits de verdrinkingsgraad kleiner is dan 95%.

- Lit. 26 Rijkswaterstaat (1988), 'Voordrachten gehouden tijdens de TOW-rivierendag 1 december 1987'. Rijkswaterstaat, Technische Universiteit Delft, Waterloopkundig Laboratorium.**
In maart 1940 wordt een wetsvoorstel voor het kanaliseren van de IJssel ingediend, maar na de oorlog weer teruggenomen. Nadien is de IJsselkanalisatie om verschillende redenen naar voren gebracht: betere bevaarbaarheid van Waal en IJssel, verminderen verzilting van Zuidwest Nederland, het beschermen van het IJsselmeer tegen calamiteuze verontreinigingen op de Rijn. In de 2^e Nota Waterhuishouding (1984) wordt definitief afgezien van IJsselkanalisatie. Geeft een tabel waaruit blijkt dat de IJssel tussen 1950 en 1983 steeds meer afvoer trekt, waarschijnlijk door de bochtafsnijdingen.
- Lit. 15 Kok, M., N. Douben, J.M. van Noortwijk, W. Silva (1996), 'Integrale Verkenning Rijntakken : veiligheid'. Waterloopkundig Laboratorium, RWS/RIZA, HKV Lijn in Water, IVR-rapport 12.**
Geeft het effect van de bodemdaling 1950-1992 op de MHW-standen, al of niet gecorrigeerd voor de afvoerverdeling. De ruwheid van het zomerbed zou in die periode zijn toegenomen als gevolg van het uitspoelen en wegbaggeren van de fijne fractie, behalve op de Nederrijn. Ook de ruwheid van de uiterwaarden is waarschijnlijk toegenomen door een ander beheer. In bijlage B een verhandeling over onzekerheden in de afvoerverdeling: op basis van afvoermetingen wordt gesteld dat de onzekerheid in de Waalafvoer $\pm 2,5\%$ is.
- lit. 6 Dijkman, J.P.M. (red) (1999), 'Aanvullende analyses'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, RWS/DON, RVR-rapport 99.07.**
Het surplus van de MHW-afvoer over de Waal leiden is goedkoper dan een evenredige verdeling over de takken. Afleiding via de IJssel is moeilijker dan de Waal, maar heeft meer toekomstwaarde als vooral voor dijkverlegging wordt gekozen. Afleiding van het surplus via de Nederrijn/Lek is het moeilijkst. Noemt een flexibel, operationeel regelwerk op de splitsingspunten gewenst (i.t.t. lit. 19, eveneens van het WL) in de trend om te streven naar risicobeheersing.
- Lit. 7 Duits, M.T., J.M. van Noortwijk (1999), 'Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken'. HKV Lijn in water, rapport PR163.**
Monte Carlosimulaties met WAQUA (benedenstrooms van Zutphen) en Sobek (hele Rijntakkenmodel) voor de hoogteligging van het zomerbed en de uiterwaard (normaal verdeeld) en de ruwheid (lognormaal verdeeld). Er wordt gebruik gemaakt van simple-random-sampling, niet van Latin-hypercube-sampling (2.000 simulaties). De afvoer is constant gehouden op 16.000 m³/s, er is geen morfologische ontwikkeling. Geeft op basis van de literatuur een tabel met variatiecoëfficiënten van Manning, echter voor verschillende rivieren, en een tabel van Chow met minima en maxima. De ruwheids- en hoogteliggingstrajecten zijn 500 m. De bodemhoogte van aangrenzende trajecten is gecorreleerd. Onzekerheden in de afvoerverdeling en bodemverhang zijn niet apart gespecificeerd, want volledig bepaald door ruwheid en bodemligging. De parameters van de kansverdeling zijn geschat door expert judgement. Bij Sobek ook gekeken naar 4 inrichtingsmaatregelen uit RvR. De 90%-nauwkeurighedsband voor de waterstanden varieert bij Sobek van ± 10 cm (Lobith) tot ± 20 cm (Ketelmeer), onafhankelijk van de inrichtingsvariant. WAQUA geeft vergelijkbare resultaten. De

verwachte waterstanden uit de Monte Carlosimulatie zijn nagenoeg gelijk aan de MHW-standen die bij het invullen van de 50%-waarde voor alle parameters worden berekend. De afvoeren per tak zijn lognormaal verdeeld. De gemiddelde afvoer verandert wel bij de RvR-maatregelen, de bandbreedte blijft hetzelfde of neemt iets toe. Door retentie in de Rijnstrangen neemt de bandbreedte in de afvoer toe, omdat een extra onzekerheidsbron wordt geïntroduceerd. Vreemd dat integrale uiterwaardverlaging met 1 meter voor de Waal een aanzienlijk lagere gemiddelde afvoer oplevert. Dit klopt ook niet met figuur 3.2.14 uit IVR-rapport 12 (lit. 15), waar bij 1 meter integrale uiterwaardverlaging juist een toename van de Waalafvoer verwacht wordt. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de correlatiecoëfficiënten. Hoe groter de correlatiecoëfficiënt van de zomerbedruwheid, hoe breder de 90%-band.

- Lit. 28 Schropp, M.H.I. (1999), 'Regelbereik afvoerverdeling Rijntakken : een verkenning bij Maatgevend Hoogwater'. RWS/RIZA, RIZA rapport 99.022.**

Onderzoekt de regelbehoefte bij de splitsingspunten als gevolg van autonome bodemontwikkeling, inrichtingsprojecten (profielverruiming en ruwheden), de vorm van de MHW-golf en morfologische ontwikkeling tijdens MHW, en extreme scenario's. Verkent vervolgens het regelbereik bij het verlagen of verhogen van kades en overlaten in de omgeving van de splitsingspunten.

- Lit. 38 Werner, M. (red.) (1999), 'Aanvullende analyses RvR: mogelijkheden voor en effecten van een andere afvoerverdeling'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, RWS/DON, RVR-rapport 99.12.**

Een andere afvoerverdeling komt steeds meer in beeld. Behandeld worden (1) wat is de maximale afvoer per tak, (2) wat zijn de maatregelenpakketten bij 1.000 m³/s extra naar de Waal c.q. de IJssel, (3) wat zijn overige effecten van een andere afvoerverdeling, (4) wat als de afvoer toeneemt tot 18.000 m³/s, (5) wat zijn de morfologische effecten?

- Lit. 35 Ubbels, A., G. Blom, A. Dollee, W. Silva, R. Westphal (1999), 'Afvoerverdeling Rijntakken : een verkenning van de mogelijkheden en effecten van een andere afvoerverdeling onder maatgevende omstandigheden'. RWS/RIZA, RIZA rapport 99.062.**

Een globale verkenning naar de mogelijkheden en effecten van een andere afvoerverdeling, gebaseerd op bestaande kennis. Uit lit. 5 zou blijken dat de afwijking maximaal 0,06% bedraagt. De morfologische ontwikkeling tot 2050 zorgt voor 0,8% minder naar de Waal, 1,0% minder naar de Nederrijn en 0,6% minder naar de IJssel (lit. 6). Gaat niet in op operationele sturing, en ook morfologie en retentie blijven buiten beschouwing. Het surplus van 1.000 m³/s via de Waal levert een kostenbesparing op ten opzichte van de huidige verdeling.

- Lit. 29 Schropp, M.H.I. (2000), 'Trends in de afvoerverdeling bij laagwater'. RWS/RIZA, RIZA rapport 99.043.**

Wat was de afvoerverdeling bij OLR in het verleden, wat is de prognose voor de toekomst, en hoe is hierin eventueel te sturen? De Waal krijgt steeds minder afvoer, ten gunste van de IJssel, omdat de bodem van het Pannerdens Kanaal sneller daalt dan die van de Waal, nog versterkt door de constructies in de Waalbochten. Een effectieve maatregel om deze trend tegen te gaan is het storten van zand in het Pannerdens Kanaal.

- Lit. 19 Most, H. van der (2000), 'Afvoerverdeling van de Rijn bij hoge afvoeren : de samenhang nader verkend : onderzoek thema 2 WB21'. WL Delft Hydraulics, RWS/RIZA, Alterra.**
Een verkenning naar de mogelijkheden tot, en de voor- en nadelen van wijziging in de afvoerverdeling bij hoge afvoeren. Waterstanden zijn zeer gevoelig voor afwijkingen in de afvoer. Pleit voor het in samenhang beschouwen van de deelsystemen (RvR, IVB, WIN). Gaat uit van 16.000 m³/s, met een doorkijk naar 18.000 m³/s. De bedoeling is de Nederrijn/Lek te ontzien. Komt tot de conclusie dat het surplus van 1.000 of 3.000 m³/s via één tak afleiden goedkoper is dan evenredige verdeling. Imponderabilia zijn niet meegenomen, zoals risico van stagnatie van afvoer naar zee, schade aan LNC-waarden, mogelijkheden voor natuurontwikkeling, uitvoeringstermijn, en dijkversterking als aanvullende maatregel. Is tegen operationele sturing, omdat dit leidt tot een meer kunstmatig systeem.
- Lit. 30 Silva, W., F. Klijn, J. Dijkman (2000), 'Ruimte voor Rijntakken : wat het onderzoek ons heeft geleerd'. RWS/RIZA, WL Delft Hydraulics, RIZA-rapport 2000.026/WL-rapport R3294.**
Extra afvoer via de Nederrijn-Lek is bijzonder moeilijk te verwerken, dus daarom is gekeken naar een andere verdeling van de MHW-afvoer. Bij het maximum per tak is alleen gebruik gemaakt van de maatregelen in de gereedschapskist. Resultaat: Waal 1.500 – 2.500 m³/s, IJssel 500 – 1.000 m³/s extra ten opzichte van 15.000 m³/s, afhankelijk van of op de benedenstroomse deeltrajecten W4 en IJ5 ook aan de doelstelling moet worden voldaan. Bij lagere afvoeren (tot 12.000 m³/s) mag de afvoerverdeling niet veranderen vanwege de morfologie. Verschillende onzekere factoren beïnvloeden de afvoerverdeling, een kwantificering wordt echter niet gegeven.
- Lit. 20 Oosting, D.H. (2001), 'Een zekere onzekerheid? : een onderzoek naar de invloed van onzekerheden in ruwheid op de overschrijdingskans van de maatgevende hoogwaterstanden op de Rijntakken en de mogelijkheden om met noodoverloopgebieden deze onzekerheden te ondervangen'. RWS/RIZA, RIZA werkdocument 2001.082X.**
Kijkt naar de onzekerheid in ruwheid van zomerbed, kribben en uiterwaarden, met en zonder het effect hiervan op de afvoerverdeling. De veranderingen in ruwheid (20% C-zomerbed en kribben, 50% k-uiterwaard) zijn ontleend aan lit. 7. Bijlage 7 geeft het effect op de MHW-standen, inclusief herverdeling van afvoer. De invloed van de kribben is het kleinst en wordt verder verwaarloosd, die van zomerbed het grootst. De effecten op de MHW zijn niet zonder meer optelbaar. Bijlage 8 geeft het effect op de afvoerverdeling in m³/s. De invloed van het zomerbed is groter dan dat van de uiterwaarden. Het effect is asymmetrisch: een verhoging van de ruwheid heeft niet hetzelfde effect als een even grote verlaging. Op basis van kansverdelingen en correlaties voor de ruwheid ontleend aan lit. 7, worden per afvoerniveau 2.000 Monte Carlotrekkingen gedaan. De σ ligt in de orde van 5 à 10 cm. Door het meenemen van onzekerheden in de ruwheid neemt paradoxaal genoeg de herhalingstijd van overstromingen af, al schijnt die conclusie niet zo geformuleerd te mogen worden.
- Lit. 31 Stijnen, J.W., M. Kok, M.T. Duits (2002), 'Onzekerheidsanalyse hoogwaterbescherming : deel A: Bovenrivieren'. HKV Lijn in Water, rapport PR464 (in prep.).**
Onderzoekt de overbelastingkans (niet hetzelfde als faalkans, het verschil is de reststerkte) van dijkvakken bij Lobith, Millingen, Tiel, Amerongen en de Duursche Waarden bij belasting door waterstand en

golfoverslag. Probabilistische benadering, referentie is de berekening volgens de Leidraad. Stochasten zijn de afvoer, golfvorm, windsnelheid, en de windrichting. Windrichting en windsnelheid verkleinen de overbelastingskans, de overige factoren vergroten de kans.

Lit. 32 Stijnen, J.W., M. Kok, M.T. Duits (2002), 'Onzekerheidsanalyse hoogwaterbescherming : deel B: Maatregelen'. HKV Lijn in Water, rapport PR464 (in prep.).

Bekijkt de kans op overstroming in relatie tot de inzet van de retentiegebieden Rijnstrangen/Liemers en Ooypolder. Besteedt geen aandacht aan het effect van retentiegebieden op de afvoerverdeling, evenmin aan het ontwerp van het inlaatwerk. Gaat ervan uit dat het inlaatwerk optimaal wordt ingezet. Maakt onderscheid tussen (1) natuurlijke onzekerheden (wind, hydraulische ruwheid, geometrie, topafvoer, golfvorm,...), (2) kennisonzekerheden (modelonzekerheden, stromingspatroon inlaatwerk, parameters kansverdelingen), en (3) planningsonzekerheden (wel of niet inzetten, volgorde van inzetten). De invloed van wind komt terug in de golfploop en golfoverslag. Maakt gebruik van een golfgenerator uit lit. 16 om MHW-golven van verschillende breedte en hoogte te maken. Geeft schattingen voor de standaarddeviatie van de onzekerheidsbronnen ruwheid/geometrie, afvoerverdeling, waterspiegel tussen MSW-stations, en de waterstand bij het retentiegebied. Samen 0,11 tot 0,25 m, afhankelijk van de tak en de aanwezigheid van retentie. De standaarddeviatie is het grootst op de IJssel, mede omdat deze tak benedenstrooms van twee splitsingspunten ligt. Kijkt verder naar onzekerheden in de kansverdeling van de afvoer en de golfvorm, zie deel A (lit. 31). Eveneens conform deel A wordt de overbelastingskans berekend voor een aantal locaties langs de Rijntakken. Door het inzetten van retentie neemt de overbelastingskans af (factor 1,2), maar lang niet zo veel als bij meer traditionele maatregelen als dijkverhoging en uiterwaardverlaging (factor 2,2).

