

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Zicht op onzekerheden in de PKB Ruimte voor de Rivier

Onzekerheden in de hydraulische effecten van rivierverruimende
maatregelen

rapport

juni 2006

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Zicht op onzekerheden in de PKB Ruimte voor de Rivier

Onzekerheden in de hydraulische effecten van rivierverruimende
maatregelen

Hanneke van der Klis, Saskia van Vuren, Simone van Schijndel

juni 2006

Inhoud

1	Inleiding	1—1
1.1	Achtergrond	1—1
1.2	Zicht op onzekerheden in de PKB RvdR.....	1—1
1.3	Doelstelling en afbakening	1—2
1.4	Aanpak.....	1—3
1.5	Organisatie.....	1—4
2	Beschrijving van de Nederlandse Rijntakken	2—1
2.1	Karakteristieken van de Nederlandse Rijntakken	2—1
2.2	Het WAQUA model en de kalibratie	2—2
2.2.1	WAQUA model voor de Nederlandse Rijntakken	2—2
2.2.2	Kalibratie van het WAQUA model	2—3
2.3	Onzekerheden in de Maatgevende Hoogwaterstanden	2—5
2.4	Overzicht van typen verruimende maatregelen	2—7
3	Inventarisatie van onzekerheden	3—1
3.1	Inleiding.....	3—1
3.2	Classificatiemethode.....	3—1
3.3	Inventarisatie van onzekerheden.....	3—3
3.3.1	Onzekerheden gerelateerd aan de context van het model.....	3—4
3.3.2	Onzekerheden gerelateerd aan het model	3—7
3.3.3	Onzekerheden gerelateerd aan de modelinvoer	3—11
3.3.4	Discussie naar aanleiding van de onzekerheidsmatrix.....	3—12
4	Maatregelen vergeleken vanuit onzekerheidsperspectief	4—1
4.1	Verhouding tussen onzekerheden.....	4—1
4.2	Mogelijkheid tot reductie van onzekerheid.....	4—3

5	De maatregelen gecombineerd.....	5—1
5.1	Inleiding.....	5—1
5.2	Bandbreedte rond hydraulisch effect bij VKA	5—1
5.3	Het VKA vanuit het perspectief van onzekerheid.....	5—3
6	Discussie, conclusies en aanbevelingen	6—1
6.1	Discussie over ‘onzekerheden in de context’	6—1
6.2	Aanbevelingen	6—3
7	Referenties	7—1
A	Maatregelen in de lopende en recent uitgevoerde projecten en in het VKA ..	A—1
B	Verslag workshop.....	B-1
B.1	Inleiding.....	B-1
B.2	De bronnen van onzekerheid	B-1
B.3	De grootte van de invloed van de onzekerheden	B-4
B.4	Aanpassingen schattingen.....	B-6
C	Onzekerheidsmatrix	C-1

I Inleiding

I.1 Achtergrond

In het project Ruimte voor de Rivier (RvdR) zijn verscheidene rivierverruimende maatregelen voorgesteld om de afvoercapaciteit van de Nederlandse Rijntakken te vergroten. Deze maatregelen hebben onder andere als doel een waterstandsverlaging te realiseren in situaties van hoge afvoeren. In de Planologische Kernbeslissing (PKB) RvdR is een voorkeursalternatief (VKA) ontworpen van een combinatie van maatregelen in het rivierengebied waarmee de binnendijkse gebieden langs de Nederlandse Rijntakken beschermd moeten worden tegen overstromingen tot aan afvoeren (bij Lobith) van 16.000 m³/s. Het VKA bestaat uit een mix van technische maatregelen, waaronder dijkversterking en ruimtelijke maatregelen, zoals het verlagen van uiterwaarden en kribben, het verwijderen van hydraulische obstakels en het aanleggen van nevengeulen.

De berekeningen van de waterstandseffecten van de rivierverruimende maatregelen in het VKA worden beïnvloed door verschillende onzekerheidsbronnen. Het Rijntakkenstelsel is complex en dynamisch. Gebrek aan kennis over de werking van het fysische systeem, en keuzes en aannames in de gebruikte modellen leiden tot onzekerheden in de waterstandseffecten. Een belangrijke vraag is in hoeverre deze onzekerheden beslissingen beïnvloeden en of de onzekerheden met behulp van slim gekozen beheer of beleid beperkt of gecontroleerd kunnen worden.

In de loop van de PKB RvdR studie en de daaraan voorafgaande studies is op verschillende momenten aandacht besteed aan onzekerheden, zowel kwalitatief als kwantitatief. Van der Klis en Van Schijndel (2005) brengen in samenwerking met de opdrachtgever een discussie op gang over 'hoe nu verder' met betrekking tot de rol van onzekerheden in de PKB Ruimte voor de Rivier. Ze geven een overzicht van studies die in het verleden zijn uitgevoerd en stellen de vraag of er extra werk nodig is om voldoende grip te krijgen op de onzekerheden.

In opdracht van Rijkswaterstaat RIZA is voorliggende studie uitgevoerd. Doel daarvan is beter zicht te krijgen op de onzekerheid in de hydraulische effecten van de verschillende type maatregelen in het voorkeursalternatief (VKA) van de PKB RvdR (WRR ATB 10027622). Hierbij is gebruik gemaakt van de aanbevelingen in Van der Klis en Van Schijndel (2005).

I.2 Zicht op onzekerheden in de PKB RvdR

De complexiteit van het rivierensysteem brengt met zich mee dat er onzekerheden zijn verbonden aan de berekeningen van de waterstandseffecten die met de geplande maatregelen worden bereikt. Gezien het maatschappelijk belang van hoogwaterbescherming en de kosten die gemoeid zijn met de geplande rivierverruimende maatregelen, is het belangrijk om te weten hoe groot de onzekerheid is rond de verwachte hydraulische effecten van de maatregelen.

Als de onzekerheid groot blijkt, is het belangrijk om te weten waar de onzekerheid door wordt veroorzaakt, hoe deze eventueel verkleind kan worden en op welke manier met de onzekerheid kan worden omgegaan. Inzicht in de onzekerheden kan voorkomen dat rivierbeheerders, de politiek of de samenleving verrast worden door onverwachte mee- of tegenvallers en door nieuwe ontwikkelingen.

In een aantal studies dat in het kader van de RvdR studie in het verleden is uitgevoerd, is ingegaan op deze onzekerheden en zijn waardevolle suggesties gedaan voor het omgaan met de onzekerheden. Genoemd kunnen worden Boertien 2 (1994), Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (1996), Ruimte voor Rijntakken (1998) en de Spankrachtstudie (2000). Van der Klis en Van Schijndel (2005) geven een globaal overzicht van wat deze voorgaande studies in dit kader hebben opgeleverd. Hieruit blijkt onder andere dat de resultaten uit de verschillende studies niet altijd op een lijn liggen en bovendien dat weinig is ingezoomd op de verschillen in onzekerheden tussen *type maatregelen*. Ook wordt opgemerkt dat er hoofdzakelijk aandacht is besteed aan onzekerheden die in principe gekwantificeerd kunnen worden in termen van kansen. Echter, sommige onzekerheden zijn niet of nauwelijks te kwantificeren. Door dergelijke onzekerheden wel mee te nemen in een onzekerheidsanalyse, wordt de mogelijkheid gecreëerd om ook op deze onzekerheden te anticiperen, middels beheer en beleid.

1.3 Doelstelling en afbakening

Het doel van deze studie is om een globale indruk te krijgen van de invloed van onzekere factoren op de betrouwbaarheid van het effect van maatregelen in het Bovenrivierengebied. Met name de mogelijkheid om verschillende type maatregelen onderling te vergelijken vanuit het perspectief van onzekerheid is hierbij belangrijk. Het is dus geen intensieve studie naar precies gekwantificeerde effecten van afzonderlijke onzekerheden. De studie richt zich op het krijgen van een zo volledig mogelijk overzicht van zowel kwantificeerbare als moeilijk of niet te kwantificeren onzekerheidsbronnen die leiden tot een onzeker effect van rivierverruimende maatregelen. Er wordt in deze studie gebruik gemaakt van beschikbare informatie uit voorgaande projecten en kennis die aanwezig is bij diverse deskundigen.

Een volgende aspect van de afbakening van de studie is dat het gaat om de betrouwbaarheid van hydraulische effecten van maatregelen uit het VKA, dus om *verschillen* in waterstand (in tegenstelling tot de betrouwbaarheid van absolute waterstanden). Daarbij maken we onderscheid naar de type maatregelen zoals deze in de PKB RvdR zijn gedefinieerd. Bovendien wordt bekeken of het zinvol is onderscheid te maken naar riviertak c.q. invloedsgebied.

Tenslotte, in de PKB RvdR gaat het om het veilig afvoeren van 16.000 m³/s (bij Lobith). In deze studie naar onzekerheden beschouwen we dit als vast uitgangspunt. Dus, gegeven het feit dat er 16.000 m³/s bij Lobith de Nederlandse Rijntakken instroomt, wat is dan de nauwkeurigheid van de berekende waterstandseffecten van de maatregelen uit het VKA?

I.4 Aanpak

Op basis van beschikbare informatie uit voorgaande projecten en kennis die aanwezig is bij diverse deskundigen, voeren we een onzekerheidsanalyse uit. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn:

- Welke factoren zorgen het meest voor onzekerheid over de waterstandsverlagingen?
- Hoe groot is deze onzekerheid, oftewel, hoe nauwkeurig worden waterstandseffecten eigenlijk berekend?
- Vormen de onzekerheden een belemmering of probleem voor het nemen van beslissingen of het uitvoeren van de maatregelen?
- Wat kan er eventueel worden gedaan om de onzekerheden te verkleinen?

Voor de onzekerheidsanalyse onderscheiden we de volgende stappen (Van der Klis et al., 2006): (1) een inventarisatie van onzekerheidsbronnen, (2) de selectie van de belangrijkste onzekerheidsbronnen, (3) het bepalen van het effect van deze onzekerheden op de berekende waterstandseffecten, en (4) de interpretatie van de onzekerheid in de waterstandseffecten en de consequenties voor beheer en beleid.

Voor de eerste drie stappen, de inventarisatie, classificatie en selectie van onzekere factoren, wordt gebruik gemaakt van de classificatiemethode van Walker et al. (2003). Dit onderdeel wordt besproken in Hoofdstuk 2. Het schatten van de bandbreedte van de waterstandseffecten per type maatregel als gevolg van de belangrijkste onzekerheidsbronnen, volgt in Hoofdstuk 3. In Hoofdstuk 4 wordt vervolgens besproken hoe de bandbreedten per type maatregel kunnen worden vertaald in een bandbreedte rond het hydraulische effect langs een hele riviertak, waarin alle maatregelen uit het VKA per riviertak gecombineerd zijn.

Bij het doorlopen van deze onderdelen wordt gebruik gemaakt van reeds beschikbare kennis. Deze kennis is zowel beschikbaar in de vorm van rapportages van eerder uitgevoerde studies als in de vorm van ervaring en inzicht van deskundigen op dit gebied. Beide informatiebronnen zijn ingezet:

- We zijn begonnen met een literatuuronderzoek, waarbij we ons hebben gericht op de onderzoeksvragen uit elk van de projectonderdelen. De memo van Van der Klis en Van Schijndel (2005) geldt hierbij als eerste aanzet.
- De resultaten uit de literatuurstudie zijn vervolgens gebruikt als aanknopingspunt voor een workshop met deskundigen. Een samenvatting van de literatuurstudie met voorlopige conclusies is ter voorbereiding aan de deelnemers gestuurd.

I.5 Organisatie

De opdracht is uitgevoerd door een team van WL-ers met een brede ervaring in onzekerheden, PKB RvdR en de daarin gebruikte WAQUA modellen:

- Hanneke van der Klis (onzekerheid in en rond hydraulische modellen, projectleiding);
- Simone van Schijndel (PKB RvdR, beheer- en beleidsaspecten);
- Chris Stolker (PKB RvdR, WAQUA modellen);
- Saskia van Vuren (onzekerheid in en rond hydraulische modellen).

Ook is gebruik gemaakt van de kennis van de volgende deskundigen bij WL:

- Ferdinand Diermanse (onzekerheid, statistiek, PKB RvdR);
- Jos Dijkman (PKB RvdR, beheer- en beleidsaspecten);
- Henk Ogink (onzekerheid in hydraulische modellen).

De volgende personen hebben deelgenomen aan de workshop met deskundigen:

- Emiel van Velzen (RIZA);
- Rick Kuggeleijn (DON);
- Ralph Schielen (RIZA);
- Hermjan Barneveld (HKV), en
- Daniëlle Noordam (UT).

Het project is vanuit Rijkswaterstaat RIZA begeleid door Dr. R. Schielen.

2 Beschrijving van de Nederlandse Rijntakken

Om de factoren die de bronnen van onzekerheid in de waterstandseffecten bepalen te kunnen identificeren, is het wenselijk de karakteristieken van het riviersysteem te beschrijven en de manier waarop de waterstanden worden bepaald aan te geven. Bovendien wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de typen maatregelen die in de PKB Ruimte voor de Rivier zijn beschouwd.

2.1 Karakteristieken van de Nederlandse Rijntakken

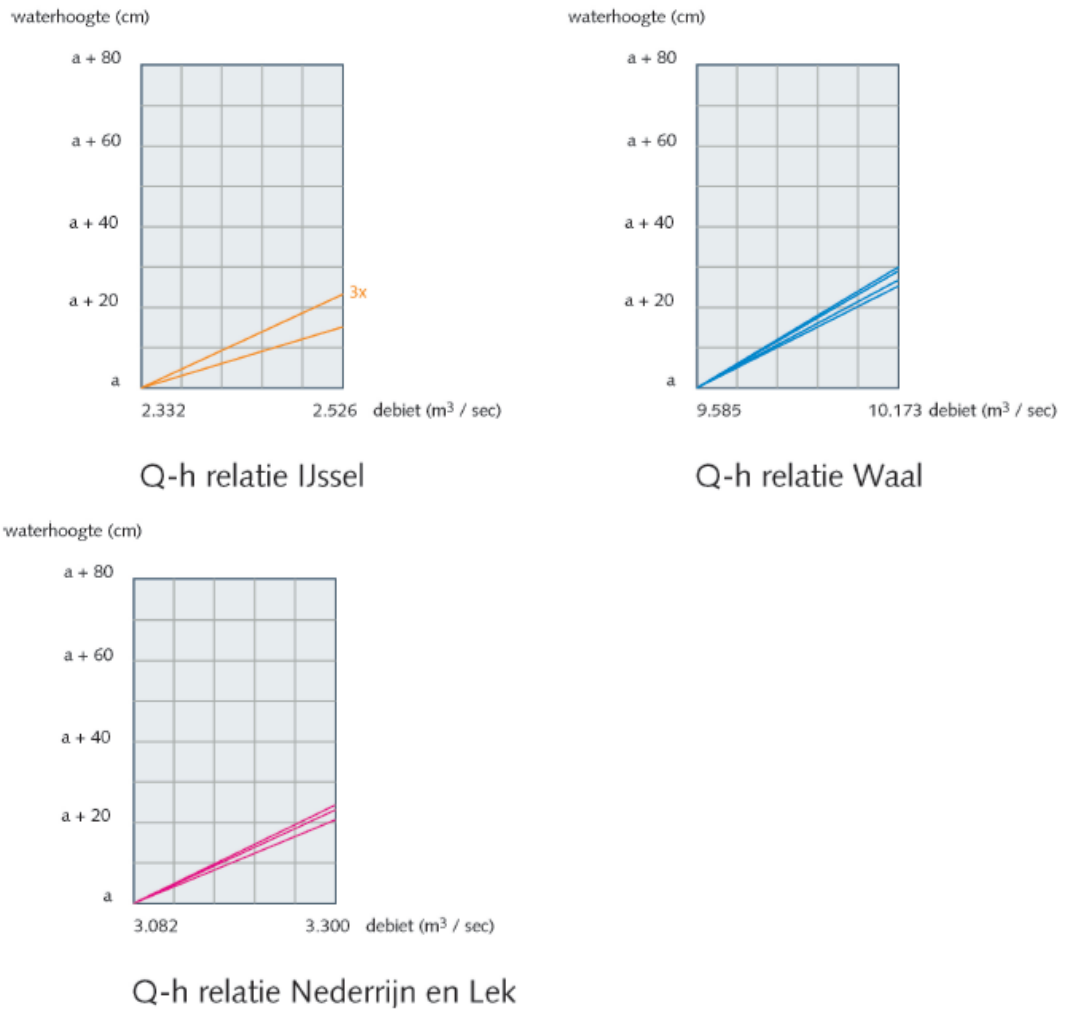
De ruimtelijke dimensies en karakteristieken van het Rijntakkenstelsel variëren per riviertak en ook binnen een riviertak. Per riviertak kan de breedteverhouding tussen hoofdgeul en uiterwaard, het uiterwaardniveau ten opzichte van het bodemniveau van het zomerbed, de aan- of afwezigheid van zomerkades, en de bergingscapaciteit in de uiterwaard variëren. Over het algemeen geldt dat de bodemhelling, de uiterwaardsbreedte en de korrelgrootte van bodemmateriaal afneemt in de richting van de Noordzee en het IJsselmeer, terwijl de breedte van het zomerbed juist toeneemt in benedenstroomse richting. De breedte van het zomerbed in de IJssel neemt zelfs relatief sterk toe van 75 m op de IJsselkop naar 175 m op de rand van het IJsselmeer. Voorbeelden van variaties in riviergeometrie binnen een riviertak zijn variaties in uiterwaardsbreedte, in kadehoogte, in ecotopen in de uiterwaard, in bergende en stroomvoerende breedte van de uiterwaard en in bochtstraal. Bovendien zorgt insnoering van de winterdijken, afwisselend op de linker en rechter uiterwaard, voor variaties. In Tabel 2-1 is een aantal kenmerkende afmetingen van de riviertakken gegeven.

Tabel 2-1 Afmetingen van Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn & Lek, en IJssel (Visser, 2000)

karakteristiek	Rijntakken				
	Boven-Rijn	Waal	Pannerdensch Kanaal	Neder-Rijn & Lek *	IJssel
lengte	10 km	84 km	11 km	93 km	126 km
breedte zomerbed	330/440 m**	260/370 m	140/200 m	130/200 m	100/120 m
breedte winterbed	850 m	550 m	400 m	400 m	550 m

* de Lek tot aan Schoonhoven, ** breedte zomerbed met en zonder kribvakken

Figuur 2-1 laat zien hoezeer een toename van de rivierafvoer van invloed is op de toename van het rivierwaterpeil (RWS, 2006). Op de horizontale as staat het debiet, gerelateerd aan toename van 15.000 tot 16.000 m³/s voor de Rijn bij Lobith bij een ongewijzigde afvoerverdeling. Op de verticale as de stijghoogte van het rivierpeil. Wat opvalt is dat over een gehele riviertak de Q-h relaties dicht bij elkaar liggen. Wel zijn er verschillen tussen de onderlinge riviertakken.



Figuur 2-1 Q-h relaties op verscheidene locaties op de Rijntakken (sommige relaties zijn identiek, de lijnen liggen op elkaar). Horizontale as: het debiet gerelateerd aan 15.000 – 16.000 m³/s bij Lobith bij een ongewijzigde afvoerverdeling; verticale as: de toename in het rivierpeil.

2.2 Het WAQUA model en de kalibratie

Bij het bepalen van effecten van maatregelen is het nodig de rivierkundige referentiesituatie scherp te definiëren. Deze uitgangssituatie vormt de basis waarmee andere berekeningen worden vergeleken en is het vertrekpunt voor rivierkundige aanpassingen. Welk model gebruikt wordt en hoe dit model gekalibreerd is, heeft dan ook een grote invloed op de bronnen van onzekerheid. Deze paragraaf beschrijft welk model is toegepast in de PKB RvdR en hoe wordt omgegaan met de onzekerheden ten gevolge van het kalibreren van dit model.

2.2.1 WAQUA model voor de Nederlandse Rijntakken

Het WAQUA-model c.q. de gebiedsschematisatie dat aan de basis heeft gelegen van de effectbepaling in de PKB RvdR is dezelfde schematisatie die gebruikt is voor het Randvoorwaardenboek 2001 (HR2001).

Voor de Baseline- en WAQUA-schematisaties, die gebruikt zijn voor alle berekeningen die in het kader van de PKB zijn uitgevoerd, is uitgegaan van de rivierkundige situatie zoals die in 2015 wordt verwacht zónder dat de PKB is uitgevoerd. In 2015 zal ten opzichte van de huidige situatie reeds een aantal rivierkundige maatregelen zijn uitgevoerd (de zogenaamde ‘autonome ontwikkeling’). Sommige belangrijke ontwikkelingen zijn daarom al in het referentiemodel opgenomen. De overige maatregelen die behoren tot de huidige situatie of de autonome ontwikkeling worden als maatregel opgenomen in de schematisatie. Bijlage A geeft een overzicht van deze maatregelen. In de schematisatie voor de PKB is geen rekening gehouden met de autonome bodemdaling.

Alle effecten zijn bepaald bij een afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith.

2.2.2 Kalibratie van het WAQUA model

Zoals aangegeven is de basis voor de PKB RvdR het model dat gebruikt is voor HR2001. Dit model is gekalibreerd met meetgegevens van het hoogwater van 1995 en geverifieerd met informatie over het hoogwater van 1993. Kalibratie is onder andere gericht op het verkleinen van bestaande onzekerheden. Door het model af te regelen op waarnemingen wordt de onzekerheid met betrekking tot het gebrek aan kennis over de werking van het systeem tijdens de kalibratieomstandigheden gereduceerd. Op die manier ontstaat meer vertrouwen in de modelresultaten tijdens condities die vergelijkbaar zijn met de kalibratieomstandigheden. De kalibratie zelf is dan ook geen bron van onzekerheid. De manier waarop deze kalibratie is uitgevoerd, is echter wel bepalend voor de manier waarop onzekerheden ten gevolge van de kalibratie doorwerken in de totale onzekerheid in de waterstandseffecten.

Naast het correct schematiseren van de geometrie en de randvoorwaarden zijn de resultaten van het model met name afhankelijk van de manier waarop wordt omgegaan met de hydraulische ruwheid. In het rekenmodel is de hydraulische ruwheid gekoppeld aan een (ruimtelijke) indeling in ruwheidstypen, zowel in het winterbed als in het zomerbed. Voor elk ruwheidstype of zomerbedtraject wordt op basis van de beschikbare kennis een waarde geschat. Ter indicatie: in totaal gaat het om ongeveer 20 ruwheidstypen en 20 zomerbedtrajecten. In het algemeen wordt de hydraulische ruwheid in het model zodanig aangepast dat maximale overeenstemming bereikt wordt tussen de gemeten en berekende waterstanden in de rivier. Om onjuiste ijking van parameters te voorkomen worden de hoogst mogelijke eisen gesteld aan de te gebruiken meetinformatie. Daarom wordt voor de ijking uitsluitend meetinformatie van MSW stations gebruikt.

Om, gezien de beperkt beschikbare meetinformatie, overijking te voorkomen wordt de ijking beperkt tot de meest belangrijke hydraulische ruwheden, te weten het zomerbed en de productiegraslanden. Omdat de zomerbedruwheid ruimtelijk varieert, is het zomerbed opgedeeld in trajecten. Elk traject is daarbij ingesloten tussen twee opeenvolgende MSW-stations, die de benodigde informatie verschaffen over dat traject.

Voor het kalibreren van het hydraulische model voor HR2001 zijn de volgende stappen uitgevoerd:

1. In de eerste stap zijn de zomerbedruwheden per traject ingeregeld bij een zogenaamde bankfull afvoer, ofwel een zomerbedvullende afvoer. Bij deze afvoer stromen de uiterwaarden nog niet mee waardoor de gemeten waterstanden en verhangen uitsluitend informatie verschaffen over de weerstand van het zomerbed.
2. In de tweede stap is de winterbedinregeling uitgevoerd. Dit is gebeurd voor een periode rond de top van het hoogwater. Hierbij zijn de ruwheid van productiegrasland ingeregeld en zijn de zomerbedruwheden opgeschaald naar de hoogwatersituatie. Door het ontstaan van beddingvormen is de ruwheid van het zomerbed bij hoge afvoeren anders dan bij bankfull. De in stap 1 gevonden onderlinge verhoudingen tussen de zomerbedruwheden van de trajecten is hierbij vastgehouden. Er is hierbij gestreefd naar een zo goed mogelijke afvoerverdeling over de takken.
3. In de derde stap heeft een fijnafregeling van de afvoerverdeling over de takken plaatsgevonden. Hierbij is de beschikbare meetinformatie gebruikt in een periode rond de top van het hoogwater.
4. In de vierde en laatste stap is een fijnafregeling van de zomerbedruwheden uitgevoerd. Dit houdt in dat na de ruwheid van productiegras en de afvoerverdeling ook de ruwheden van het zomerbed per traject kan worden afgeregeld voor de periode rond de top van het hoogwater.

Door kalibreren worden veel onzekerheden ten aanzien van bijvoorbeeld het gedrag van het zomerbed tijdens hoogwater en de ruwheid van vegetatie ‘weggekalibreerd’. En ondanks het feit dat kalibratie de onzekerheden verkleint, is het wel noodzakelijk de onzekerheden ten gevolge van kalibratie te benoemen.

Het verband tussen kalibratie en onzekerheden in de modelresultaten kan als volgt worden beschreven. Het startpunt van de kalibratie is de natuurlijke variabiliteit. Het systeem vertoont immers een natuurlijke variabiliteit die niet gevangen wordt door van één set metingen uit te gaan en vervolgens één instelling voor de ruwheden te kiezen. Vervolgens is de onzekerheid in de modelresultaten groter dan deze natuurlijke variabiliteit doordat onze kennis over het systeem beperkt is en we het gekalibreerde model gebruiken voor veel extremere situaties (zoals MHW-omstandigheden). Op welke punten de kennis beperkt is, staat uitgesplitst in de bronnen van onzekerheid die we onder ‘beperkte kennis’ scharen.

De invloed van kalibratie op de onzekerheid in de waterstandseffecten wordt dan als volgt verwerkt in afzonderlijke bronnen van onzekerheid (Hoofdstuk 3):

- De kalibratiemethode bepaalt mede in welke mate onzuiverheden of onzekerheden in het model worden gecompenseerd via de ruwheid in het zomerbed. De WAQUA modellen zijn bijvoorbeeld gekalibreerd op waterstanden op de as van de rivier. Stroomsnelheden en de verdeling van afvoer over het zomer- en winterbed spelen in de kalibratie geen rol. Deze aspecten zijn echter wel belangrijk voor het bepalen van het hydraulisch effect van de maatregelen (zoals onder andere is aangetoond voor ééndimensionale modellen in onderzoek in het kader van de Maaswerken). Het is dus onzeker of de ruwheden in het zomer- en winterbed zodanig zijn afgeregeld dat die aspecten van de stroming die het waterstandeffect bepalen juist worden gemodelleerd. Deze onzekerheid uit zich dus in de waardes voor zomer- en winterbedruwheid.
- Gebruikte kalibratiegegevens zijn zelf onzeker door meetfouten. Deze onzekerheid uit zich in het afregelen van de ruwheden in het zomerbed en de ruwheid van productiegrasland in het winterbed.

- De keuze voor één beperkte set meetgegevens voor de kalibratie druist in tegen de natuurlijke variabiliteit van het systeem. Deze onzekerheid uit zich in de onzekerheid over de gebruikte waarden voor de zomerbedruwheid, die geen rekening houden met de natuurlijke variabiliteit.
- Het gekalibreerd model wordt gebruikt voor waterstandseffecten onder extremere afvoeren dan gemeten. Het is de vraag of het model geschikt is voor deze omstandigheden. Deze onzekerheid uit zich
 - in onzekerheid over de ruwheidsformuleringen in het zomer- en winterbed,
 - in onzekerheid over de k -waarden voor de ruwheid in het winterbed,
 - in onzekerheid over de kalibratiefactor in de ruwheidsformulering voor het zomerbed, en
 - in onzekerheid over de modellering van de fysische processen onder extreme omstandigheden.
- Het model wordt, uiteraard, niet opnieuw gekalibreerd voor de situatie na uitvoering van de maatregelen. Het is daarmee onzeker in hoeverre de ruwheden in zomer- en winterbed nog voldoende zijn afgeregeld voor de nieuwe situatie. Voor dit model gelden daarom de onzekerheden die hierboven staan beschreven, in sterkere mate.

Ook op een andere manier is de rol van modelkalibratie belangrijk in een onzekerheidsanalyse, namelijk voor onzekerheden over bijvoorbeeld de geometrie van de rivier, of over fouten in de schematisatie. Een voorbeeld: als een kade in een uiterwaard verkeerd is geschematiseerd is deze fout deels gecompenseerd door de modelkalibratie. Om de invloed van deze fout op de waterstandseffecten te berekenen zou het model opnieuw gekalibreerd moeten worden met de verbeterde schematisatie, om vervolgens met dit opnieuw afgeregelde model het effect op de waterstand te berekenen. Kortom, bij dit soort onzekerheden moet de ‘onzekerheidsdempende’ werking van kalibratie meegenomen worden.

2.3 Onzekerheden in de Maatgevende Hoogwaterstanden

Deze studie richt zich op de onzekerheid in de waterstandseffecten van maatregelen uit het VKA van de PKB Ruimte voor de Rivier. In de volgende hoofdstukken gaan we dan ook niet expliciet in op de onzekerheid in absolute waterstanden onder maatgevende condities. Omdat deze onzekerheden ter vergelijking wel relevant en illustratief zijn geeft deze paragraaf een korte toelichting op de onzekerheden in de MHW's zoals deze momenteel worden gehanteerd. Daarbij richten we ons op de huidige situatie, dus zonder uitvoering van rivierverruimende maatregelen. De onzekerheid in de situatie mét maatregelen is groter, bijvoorbeeld doordat het model niet op die nieuwe situatie gekalibreerd kan worden (vergelijk de inventarisatie van onzekerheden in Hoofdstuk 3).

De standaardafwijkingen in Tabel 2-2 worden door RIZA (Van Vuuren, 2003 en Van Velzen, 2003) aangehouden als maat voor de onzekerheid in de lokale hoogwaterstanden (MHW). Uitgaande van normale kansverdelingen is de onzekerheid rond de MHW's plus of min twee maal de standaardafwijking. Dus: volgens Tabel 2-2 is de MHW op de Waal het officiële toetspeil plus of min 27,6 cm (als maximale onzekerheid). Deze nauwkeurigheid van de toetspeilen wordt geschat op basis van de volgende componenten:

1. De natuurlijke variabiliteit van het riviersysteem zoals waargenomen bij opgetreden hoogwaters. Deze spreiding is het grootst voor de Neder-Rijn en de IJssel, doordat deze riviertakken achter twee splitsingspunten liggen t.o.v. Lobith. De grotere variabiliteit in de IJssel heeft bovendien te maken met de relatief grote zijdelingse instroming.
2. Modelonzekerheid, bestaande uit:
 - a) onzekerheid over de representativiteit van het (de) kalibratiehoogwater(s), en
 - b) onzekerheid in de extrapolatie van kalibratiehoogwater(s) naar maatgevend hoogwater door:
 - i) fouten in de procesbeschrijving, schematisatie en procesparameters, die door ijking terecht komen in de zomerbedruwheid, en
 - ii) veranderingen in de fysische processen van het kalibratiehoogwater naar het maatgevend hoogwater, met name dat van de hydraulische ruwheid van het zomerbed.

Tabel 2-2 Onzekerheid (standaardafwijking) in de MHW's (in cm) door natuurlijke variabiliteit en modelonzekerheid

Bron		Waal	Pann. Kanaal	Neder-Rijn	IJssel
Natuurlijke variabiliteit [cm]	Hele reeks	6,4	4,8	12,0	17,0
	Q>8000 m ³ /s	4,1	5,3	9,3	11,1
Model [cm]	<i>Representativiteit</i>	5	5	5	5
	<i>Schematisatie, etc</i>	5	5	5	5
	<i>Fysische processen</i>	10	-	6	5
	Totaal modelonzekerheid	12,2	-	9,3	8,7
Totale onzekerheid in MHW's [cm]	Minimum	12,9	12,9	13,2	14,1
	Maximum	13,8	13,8	15,2	19,1

Ogink (2003) analyseerde de resultaten van Van Velzen (2003) en Van Vuuren (2003) en stelt dat de gepresenteerde standaardafwijkingen een te optimistisch beeld geven van de aanwezige variabiliteit in de waterstandrelatie voor de zeer hoge afvoeren.

Ter vergelijking: in de Verkennende Beleidsanalyse Rampenbeheersing (HKV en WL, 2003) worden de standaardafwijkingen voor de onzekerheid in de lokale waterstanden gebruikt als in Tabel 2-3. Met name de grotere onzekerheid voor de waterstanden op de IJssel valt op.

In bijvoorbeeld de studie Integrale Verkenning inrichting Rijntakken (IVR) werden ongeveer twee keer zo grote onzekerheden geschat: Maatgevende hoogwaterstand plus of min 60 cm (vergeleken met de 27,6 cm o.b.v. Tabel 2-2). Ongeveer de helft van deze 60 cm is toe te schrijven aan de onzekerheid in de maatgevende afvoer, een bron van onzekerheid die in deze studie buiten beschouwing wordt gelaten.

Tabel 2-3 Standaarddeviaties voor onzekerheid in de lokale waterstanden volgens (HKV en WL, 2003).

Riviertak	Standaarddeviatie [cm] (HKV en WL, 2003)
Waal	12
Neder-Rijn	17
IJssel	25

2.4 Overzicht van typen verruimende maatregelen

Het totaalpakket aan rivierverruimende maatregelen waarmee de dijkringgebieden langs de Nederlandse Rijntakken verder beschermd moeten worden tegen overstromingen bestaat uit:

1. lopende en recent uitgevoerde maatregelen die reeds vooruitlopend op de PKB RvdR zijn gestart,
2. maatregelen die in het voorkeursalternatief (VKA) van de PKB RvdR studie zijn voorgesteld.

De relevantie van een bron van onzekerheid voor het waterstandseffect verschilt per type maatregel. Aangezien per riviertak en zelfs binnen een riviertak de ruimtelijke dimensies en karakteristieken variëren, zal niet alleen het effect van een type maatregel, maar ook het belang en de ordergrootte van de onzekere factoren in ruimtelijke zin variëren. Daarom wordt in deze studie de onzekerheid in het waterstandseffect per *type* maatregel onderzocht en tevens onderscheid gemaakt naar de riviertakken. Deze paragraaf geeft een overzicht van de typen maatregelen die in de PKB Ruimte voor de Rivier worden beschouwd. In het vervolg van dit rapport zullen de onzekerheden voor ieder van deze typen verder worden uitgewerkt.

Het totaalpakket aan rivierverruimende maatregelen bestaat uit een mix van technische maatregelen, waaronder dijkverlegging en ruimtelijke maatregelen, zoals het verlagen van uiterwaarden en kribben, het verwijderen van hydraulische obstakels en het aanleggen van nevengeulen. De maatregelen die in de lopende en recent uitgevoerde projecten en in het VKA per riviertak zijn voorgesteld staan beschreven in Bijlage A.

In deze studie bespreken we de onzekerheden per *type* maatregel, waarbij we tevens onderscheid maken tussen de diverse Rijntakken. In Bijlage A zijn de type rivierverruimende maatregelen per riviertak weergegeven.

De type maatregelen zijn onderverdeeld in:

- Uiterwaardplannen
 - aanleg van een nevengeul gecombineerd met natuurontwikkeling, te weten de aanleg van natuurlijk grasland; en
 - afgraving van de uiterwaard en aanleg van een nevengeul, gecombineerd met natuurontwikkeling, te weten de aanleg van natuurlijk grasland.
- Kribverlaging – het verlagen van de hoogte van de kribben resulteert in een mindere stroomweerstand van de krib om zodoende een waterstandsval te realiseren.

- Grootschalige dijkverlegging – bij grootschalige dijkverlegging gaat het om het over een grote lengte verleggen van de winterdijk. Het winterbed wordt over een grote lengte verbreed.
- Knelpunten – hydraulische knelpunten belemmeren de doorvoer van het water tijdens hoge afvoeren. Deze knelpunten kunnen worden onderverdeeld in hoogwatervrije terreinen, hoge kades dwars op de stroomrichting van de rivier, zoals bruggenhoofden en veerstoepen, en vernauwingen in het winterbed.
- Groene rivier – een groene rivier is een nieuwe rivierloop in het binnendijkse gebied, die alleen bij extreem hoge afvoeren watervoerend zal zijn.
- Zomerbedverdieping – bij deze maatregel wordt het zomerbed verdiept. De maatregel is met name effectief in de benedenstroomse gebieden. Met regelmatig baggerwerk moet het zomerbed op diepte worden gehouden.

Tabel 2-4 Type maatregelen per riviertak in het VKA.

Riviertak	Type maatregelen per riviertak in het VKA
Boven-Rijn	<ul style="list-style-type: none"> • uiterwaardplan
Waal	<ul style="list-style-type: none"> • kribverlaging • grootschalige dijkverlegging • uiterwaardplan
Pannerdensche Kanaal	<ul style="list-style-type: none"> • kribverlaging • uiterwaardplan
Neder-Rijn	<ul style="list-style-type: none"> • grootschalige dijkverlegging • uiterwaardplan • knelpunt
IJssel	<ul style="list-style-type: none"> • grootschalige dijkverlegging • uiterwaardplan • groene rivier
IJsseldelta	<ul style="list-style-type: none"> • grootschalige dijkverlegging • uiterwaardplan • knelpunt • zomerbedverdieping

3 Inventarisatie van onzekerheden

3.1 Inleiding

Het uiteindelijke doel van deze studie is zicht te krijgen op de onzekerheid in het waterstandseffect per rivierverruimende maatregel, en een uitspraak te doen over de onzekerheid in het hydraulische effect langs een hele riviertak. Dit hoofdstuk geeft een inventarisatie van de factoren die deze onzekerheid beïnvloeden.

In eerste instantie wordt een algemene opsomming van onzekerheidsbronnen gegeven, ongeacht het type maatregel en de riviertak. Hierbij is gebruik gemaakt van de classificatiemethode van Walker et al. (2003) (Paragraaf 3.2). Uit deze algemene classificatie zijn per type maatregel en per riviertak de meest relevante onzekerheden geselecteerd.

In dit onderdeel van het project staan de volgende vragen centraal:

- Welke bronnen van onzekerheid spelen een rol, als het gaat om de betrouwbaarheid van de berekende hydraulische effecten van maatregelen uit het VKA?
- Hoe is elk van deze onzekerheden te classificeren?
- Welke bronnen van onzekerheid zijn met name van belang voor de algehele onzekerheid over de hydraulische effecten van de maatregel?
- Hoe groot is elk van deze geselecteerde onzekerheden, of hoe groot is de invloed op de waterstandseffecten?

3.2 Classificatiemethode

De hydraulische effecten van de geplande maatregelen en daarmee de beslissingen die op grond daarvan worden genomen, worden beïnvloed door tal van onzekerheden. Deze onzekerheden hebben elk hun eigen dimensie, achtergrond en karakteristieken. Ze zijn gerelateerd aan gebrek aan kennis, informatie, beschikbare gegevens, of ze komen voort uit de variabiliteit van de natuur. Bovendien kunnen ze verschillen qua ordergrootte en relevantie voor het probleem. Het is daarom verstandig onderscheid te maken tussen verschillende soorten onzekerheden. Om grip te krijgen op de diverse bronnen van onzekerheid en de communicatie erover te vergemakkelijken is gebruik gemaakt van de classificatiemethode van Walker et al. (2003).

Walker et al. (2003) maakt onderscheid tussen drie (onafhankelijke) kenmerken van een onzekerheid:

- de *plaats* waar de onzekerheden zich manifesteren in de aanpak van het probleem, d.w.z. komen ze tot uiting in bijvoorbeeld de modelinvoer of de modelrelaties, of juist in de context waarin het model gebruikt wordt,
- de *graad* van de onzekerheden, d.w.z. zijn ze goed te kwantificeren in termen van kansen of is het volstrekt onduidelijk hoe groot de onzekerheden zijn,

- de *aard* van de onzekerheden, d.w.z. komen ze voort uit de variabiliteit van de natuur of uit gebrek aan kennis over de fysische processen (dit onderscheid wordt meestal gemaakt, ook in eerdere studies in het kader van RvdR).

In Walker's classificatiemethode worden deze drie kenmerken gerangschikt in een matrix, ook wel de *onzekerheidsmatrix* genoemd. De eenvoudige structuur van de matrix maakt het een goed hulpmiddel bij deze onzekerheidsanalyse. De matrix kan gebruikt worden om (1) een zo volledig mogelijk overzicht te krijgen van de onzekerheden die een rol spelen, (2) technieken te specificeren die nodig zijn om het effect van de onzekerheden op de nauwkeurigheid van de ontwerpwaterstanden te schatten en (3) tot een goede interpretatie van de onzekerheid in de ontwerpwaterstanden te komen en de communicatie hierover te vergemakkelijken.

Tabel 3-1 Ter illustratie: een onzekerheidsmatrix met een paar voorbeelden van bronnen van de onzekerheid in waterstandseffecten gerangschikt naar de drie dimensies plaats, graad en aard.

Plaats onzekerheid in het proces		Onzekerheidsgraad			Onzekerheidsaard	
		Kwantificeerbaar in kansen		Erkende onwetendheid	Beperkte kennis	Variabiliteit
Context		morfodynamiek				morfo-dynamiek
Model	Structuur	ruwheidsformulering winterbed	gridresolutie	fouten in schematisatie	gridresolutie fouten in schematisatie	ruwheidsformulering winterbed
	Technisch	numerieke fout		bugs in software	numerieke fout bugs in software	
Invoer	Randvoorwaarden	laterale instroming Q-h relatie				laterale instroming Q-h relatie
	Systeemdata	winterbedruwheid (k-waardes)	riviergeometrie		winterbedruwheid (k-waardes)	rivier-geometrie

Een voorbeeld van een onzekerheidsmatrix is gegeven in Tabel 3-1 (de volledige onzekerheidsmatrix bij deze studie staat in Bijlage C). In de matrix zijn verschillende bronnen van de onzekerheid in waterstandseffecten gerangschikt. Elke onzekere factor komt tweemaal voor: eenmaal in de kolom 'onzekerheidsgraad' en eenmaal in de kolom 'onzekerheidsaard'. Elke regel van de matrix representeert een *plaats* waar een onzekerheid zich in het proces kan manifesteren:

- Context: deze onzekerheid is gerelateerd aan de economische, politieke, sociale en technologische omgeving waarin het model staat waarmee waterstandseffecten worden bepaald.
- Model: deze onzekerheid is onderverdeeld in twee categorieën:
 - Modelstructuur onzekerheid: die betrekking heeft op de modelschematisatie en -relaties, en
 - Modeltechnische onzekerheid: die gerelateerd is aan de computerimplementatie van het model.

- Invoer: deze onzekerheid is als volgt onderverdeeld:
 - Randvoorwaarden: onzekerheid in de randvoorwaarden, die van buitenaf veranderingen in het systeem teweegbrengen, en
 - Systeemdata: onzekerheid in de parameters en gegevens waarmee het systeem beschreven wordt.

3.3 Inventarisatie van onzekerheden

Deze paragraaf geeft een algemene classificatiematrix, onafhankelijk van het type maatregel en de riviertak. De bronnen van onzekerheid in deze matrix worden uitvoerig toegelicht. Bovendien wordt beschreven hoe relevant onzekerheidsbronnen per type maatregel en riviertak zijn.

Bij het opstellen van de algemene classificatiematrix is gebruik gemaakt van beschikbare informatie uit voorgaande studies en kennis die aanwezig is bij diverse deskundigen. Deze deskundigen zijn geraadpleegd in een workshop, waarvan het verslag is opgenomen in Bijlage B. De resulterende matrix (Bijlage C) geeft een overzicht van de bronnen van de onzekerheid in de waterstandseffecten van de rivierverruimende maatregelen, gerangschikt naar de drie dimensies *plaats*, *graad* en *aard*. De onzekerheidsbronnen in de matrix worden voor elke plaats waar de onzekerheid zich manifesteert – context, model en invoer – in de volgende subparagrafen toegelicht. Tabel 3-2 geeft om te beginnen een overzicht.

Tabel 3-2 Overzicht van de onzekerheidsbronnen die in de volgende paragrafen worden toegelicht.

<u>Onzekerheden in de context</u>	overlaatformulering
klimaatverandering	invloed gridresolutie op schematisatie
morfodynamiek	fouten in modelschematisatie
afvoerverdeling splitsingspunten	vorm afvoergolf
seizoensvariatie winterbed	modelimplementatie
menselijk handelen	
beheer	<u>Onzekerheden in modelinvoer</u>
	laterale instroming
<u>Onzekerheden in modelstructuur</u>	Q-h relatie op benedenstroomse randen
procesbeschrijving	riviergeometrie
formulering ruwheid zomerbed	ruwheidswaarden winterbed
formulering ruwheid winterbed	

3.3.1 Onzekerheden gerelateerd aan de context van het model

De onzekerheidsbronnen die zich manifesteren in de context waarin de WAQUA modellen worden gebruikt, stellen in feite de *uitgangspunten* van de PKB RvdR aan de orde. Hoe zeker is het bijvoorbeeld dat de afvoerverdeling over de splitsingspunten niet verandert na uitvoering van het VKA. Alhoewel dergelijke vragen zinvol zijn, vormen ze niet het doel van deze studie. Onzekerheden gerelateerd aan de context van het model krijgen daarom een andere status binnen deze studie. Er wordt in het vervolg onderscheid gemaakt tussen ‘directe’ en ‘indirecte’ onzekerheden. ‘Directe’ bronnen van onzekerheid zijn onzekerheden die voortkomen uit de modelschematisatie en modelformuleringen én modelinvoer. ‘Indirecte’ onzekerheidsbronnen zijn bronnen die gerelateerd zijn aan de context van het model. Bij de globale inschatting van de totaalonzekerheid rond het hydraulische effect van verschillende type maatregelen in het project zal alleen de invloed van de ‘directe’ bronnen worden aangegeven. De invloed van de ‘indirecte’ bronnen worden in Hoofdstuk 6 bediscussieerd.

Onzekerheidsbronnen die zijn gerelateerd aan de context van het model, waarmee het effect van een maatregel wordt berekend, zijn:

1. Klimaatsveranderingen

Mogelijke structurele klimaatwijzigingen kunnen bijdragen aan veranderingen in de maatgevende afvoergolf. De intensiteit en het patroon van neerslag in het stroomgebied is bepalend voor de vorm van de afvoergolf die vanuit Duitsland bij Lobith aankomt.

Voor de PKB Ruimte voor de Rivier is de onzekerheid rond de klimaatsveranderingen niet direct relevant. Immers, de hydraulische effecten van de maatregelen worden bepaald voor het riviersysteem in de huidige situatie, onder de huidige omstandigheden. Op lange termijn kan een veranderende vorm van de afvoergolf de waterstandseffecten beïnvloeden. De verwachting is dat afvoeren hoger worden, waarbij de afvoergolf gemiddeld niet van vorm verandert. Dat betekent dat de duur van een eventuele afvoer van 16.000 m³/s waarschijnlijk toeneemt.

2. Morfodynamiek

In de huidige praktijk wordt voor hoogwaterstandsvoorspellingen gebruik gemaakt van hydraulische modellen met een vaste bodemligging. In morfologisch actieve rivieren is het echter waarschijnlijk dat de morfologie van de rivierbodem de hoogwaterstanden beïnvloedt. In Van Vuren (2005) is voor maatgevende hoogwaterstanden in de Nederlandse Rijntakken het effect van onzekerheid onderzocht in:

- a) lokale seizoensafhankelijke bodemdynamiek
- b) lange en middellange termijn grootschalige morfodynamiek
- c) morfodynamiek rond splitsingspunten

Het effect van seizoensvariatie in de bodemligging op hoogwaterstanden blijkt uiterst gering. De middellangetermijn variaties in de bodemligging (zoals autonome bodemdaling) en de morfologische activiteit rond splitsingspunten hebben een groter effect op hoogwaterstanden.

In Van Vuren et al. (2005) wordt met een ééndimensionaal model het effect van een verhoogde morfodynamiek als gevolg van uiterwaardverlaging in combinatie met zomerkadeverwijdering op de maatgevende waterstanden onderzocht. De invloed van de toegenomen bodemdynamiek op de hoogwaterstanden is volgens dit onderzoek klein ten opzichte van het waterstandsverlagende effect van de maatregelen (in de orde van een centimeter).

Onderdeel van het eisenpakket waaraan een rivierverruimende maatregel en uiterwaardplan moet voldoen, is de voorwaarde dat de morfodynamiek niet ongewenst verandert. Als een plan niet aan deze eis voldoet moet een ander ontwerp gemaakt worden. Om die reden wordt aangenomen dat deze bron van onzekerheid klein is. De vraag is of het morfologische effect van een ingreep goed voorspeld kan worden en of het mogelijk is de verandering in morfodynamiek tot een minimum te beperken. De morfologische onzekerheden blijven dus zeker van belang voor de waterstandseffecten.

3. Afvoerverdeling op splitsingspunten

De afvoerverdeling op de splitsingspunten bij maatgevend hoogwater wordt bepaald door de verhouding van de afvoercapaciteit van de benedenstroomse takken en door de vorm van het splitsingspunt (Ogink, 2006). De afvoercapaciteit van de riviertakken is afhankelijk van het doorstroomprofiel, de hydraulische ruwheid, het waterstandsverhang, de waterdiepte, wind en de effectieve viscositeit.

Op basis van bestaande studies heeft Ogink (2006) een schatting gemaakt van de onzekerheid in afvoerverdeling bij de maatgevende afvoer in het huidige riviersysteem. Dit resulteerde in een standaardafwijking in de afvoer van de Waal, Neder-Rijn en IJssel bij MHW van 125-180, 85-100 en 85-90 m³/s, respectievelijk. Volgens Tabel 3-3 komt dit overeen met een standaardafwijking van maximaal 10 centimeter in de MHW's. Uitgaande van een normale kansverdeling geldt dat het 90%-betrouwbaarheidsinterval gelijk is aan 3,3 maal de standaardafwijking.

Tabel 3-3 Verandering in de waterstand H op de Rijntakken als de afvoer op de tak met 100 m³/s verandert bij een afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith (Ogink, 2003).

	Waal	Pannerdensch Kanaal	Neder-Rijn / Lek	IJssel
ΔH (cm) per 100 m ³ /s afvoer op de tak	4	7	8	10

Een eis die aan het VKA gesteld wordt, is dat de afvoerverdeling op de splitsingspunten in de nieuwe situatie overeen moet komen met de beleidsmatige afvoerverdeling. Als uit berekeningen blijkt dat dit niet het geval is, is een nieuw ontwerp vereist. Deze eis geldt overigens nadrukkelijk voor het maatregelenpakket als geheel, niet voor individuele maatregelen.

Het blijft echter de vraag of de afvoerverdeling na uitvoering van de maatregelen goed voorspeld kan worden, en dus of de onzekerheid hierover toeneemt. Voor deze studie is dus de vraag van belang in hoeverre rivierverruimende maatregelen de afvoerverdeling op splitsingspunten toch beïnvloeden. Immers, alleen dan heeft deze factor invloed op de onzekerheid in de waterstandseffecten van de maatregelen.

Door Duits en Van Noortwijk (1999) is het effect van een aantal inrichtingsalternatieven op de afvoerverdeling geanalyseerd. Daarbij zijn onzekerheden in bodemhoogte van zomer- en winterbed, benedenstroomse randvoorwaarden en hydraulische ruwheden in zomer- en winterbed beschouwd. Zonder in detail te treden over de verschillen tussen deze inrichtingsvarianten staan in Tabel 3-4 de berekende variaties rond de gemiddelde afvoer, in termen van 95%- en 5%-percentielen. De absolute waarden in deze tabel zijn volgens Ogink (2006) te groot, maar de verhoudingen tussen de referentiesituatie en de alternatieven kloppen wel. Geen van de alternatieven komt exact overeen met het VKA. Echter, omdat ze zijn opgebouwd uit dezelfde type maatregelen en uiterwaardplannen als het VKA zijn de bevindingen ook nu relevant. De resultaten lijken te wijzen op een uiterst klein effect op de onzekerheid in de afvoerverdeling: de afwijking in de afvoerverdeling neemt een paar tientallen m³/s toe door de inrichtingsalternatieven. De morfodynamiek rond de splitsingspunten als gevolg van de ingrepen is echter buiten beschouwing gebleven.

Tabel 3-4 Verschillen tussen het 95%- en 5%-percentiel waarden en de gemiddelde afvoer per riviertak voor de referentiesituatie en de inrichtingsmaatregelen (HKV, 1999).

Riviertak	Waal	Pannerdensch Kanaal	Neder-Rijn/Lek	IJssel
Referentiesituatie	-172 – 174 m ³ /s	-171 – 174 m ³ /s	-151 – 155 m ³ /s	-170 – 178 m ³ /s
inrichtingsalternatief 1	-185 – 187 m ³ /s	-184 – 188 m ³ /s	-149 – 153 m ³ /s	-172 – 180 m ³ /s
inrichtingsalternatief 2	-196 – 198 m ³ /s	-195 – 199 m ³ /s	-154 – 159 m ³ /s	-174 – 183 m ³ /s
inrichtingsalternatief 3	-199 – 201 m ³ /s	-198 – 202 m ³ /s	-156 – 161 m ³ /s	-175 – 183 m ³ /s
inrichtingsalternatief 4	-180 – 182 m ³ /s	-179 – 183 m ³ /s	-144 – 148 m ³ /s	-160 – 167 m ³ /s

4. Seizoensvariatie in vegetatie winterbed

Een uitgangspunt bij het bepalen van MHW's, en daarmee ook in de PKB, is dat hoogwater optreedt in de winter. Daarom wordt in de modellen uitgegaan van wintervegetatie in de uiterwaarden. In werkelijkheid kan een hoogwater ook in een ander seizoen optreden, waarbij de andere kenmerken van de vegetatie een belangrijke invloed op de MHW's kunnen hebben. Deze onzekerheid is potentieel van belang voor rivierverruimende maatregelen waarin de winterbedvegetatie verandert ten opzichte van de huidige vegetatie.

5. Menselijk handelen

Onzekerheid in het 'menselijk handelen' bij bijvoorbeeld het inlaatwerk voor de groene rivier bij Veessen-Wapenveld is een bron van onzekerheid voor het waterstandseffect dat uiteindelijk met deze maatregel behaald wordt. In de PKB wordt geen rekening gehouden met dergelijk 'falen'.

6. Beheer van uitgevoerde maatregelen

Het hydraulisch effect van een verruimende maatregel hangt op termijn onder andere af van de mate waarin de rivier en uiterwaarden beheerd worden.

3.3.2 Onzekerheden gerelateerd aan het model

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee categorieën:

- Onzekerheid met betrekking tot modelstructuur
- Onzekerheid met betrekking tot de computerimplementatie van het model

Onzekerheidsbronnen die zijn gerelateerd aan de modelstructuur en -relatie zijn:

1. Procesbeschrijving

De waterstandseffecten worden berekend met een tweedimensionaal model, hetgeen betekent dat 3D effecten moeten worden geparametriseerd. Daarnaast hebben beperkingen van het model tot gevolg dat niet alle stromingsprocessen in detail worden beschreven. Beperkingen zijn bijvoorbeeld de turbulentiemodellering, de constante eddy viscositeit en de gridresolutie.

Deze bron van onzekerheid is voor de betrouwbaarheid van waterstandseffecten van belang in die gevallen dat bijvoorbeeld specifieke 3D processen of turbulentie een rol spelen rond de betreffende maatregel. Als deze processen *veranderen* door de rivierkundige ingreep wordt het waterstandseffect mogelijk onder- of overschat.

2. Formulering van ruwheid zomerbed

Onzekerheidsbronnen als gevolg van de ruwheidformulering in het zomerbed zijn:

- a) Voor de ruwheid in het zomerbed is de ruwheidshoogte k afhankelijk van de waterdiepte op basis van een empirische formule. Het is onzeker in hoeverre deze beschrijving geschikt is voor de Nederlandse Rijntakken, met name onder extreme omstandigheden.
Omdat de formulering van de hydraulische ruwheid in het zomerbed hetzelfde is voor het referentiemodel en het model met doorgevoerde maatregel is het de verwachting dat deze bron van onzekerheid van ondergeschikt belang is voor de waterstandseffecten.
- b) De definitie van de ruwheidstrajecten. In het model wordt de ruwheid gedefinieerd voor trajecten tussen opeenvolgende MSW-stations. Deze trajecten hebben geen fysische achtergrond. In het gebied is slechts een beperkt aantal stations aanwezig.
- c) In dit kader is het bovendien belangrijk te constateren dat de ruwheid in het zomerbed wordt gebruikt als kalibratieparameter. Of preciezer, dat de formulering van de ruwheid wordt aangepast ter kalibratie van het model. Het is onzeker in hoeverre deze kalibratie alle omstandigheden representeert en hoe groot de natuurlijke variabiliteit is die rondom deze kalibratie gedacht moet worden.

De ruwheid in het zomerbed bepaalt (samen met de ruwheid in het winterbed) de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. In de modelkalibratie wordt geen aandacht besteed aan deze verdeling. Als deze verdeling niet correct is (vergeleken met de werkelijkheid) is ook het berekende effect van een maatregel niet correct.

3. Formulering van ruwheid winterbed

In het WAQUA-model wordt de ruwheid uitgedrukt in de Chézy coëfficiënt C . De waarde wordt berekend met behulp van de White-Colebrook ruwheidsvoorspeller met Nikuradse ruwheidshoogte k . Daarmee is C afhankelijk van de waterdiepte.

In het winterbed worden ook bijvoorbeeld gebouwen en heggen met behulp van een k -waarde geschematiseerd.

Zowel de k waarden als de vertaling naar Chézy waarden is gebaseerd op empirische kennis. Onzekerheid over deze formulering omvat de vraag of de gebruikte formuleringen geschikt zijn voor het riviersysteem, of deze ook geschikt zijn onder maatgevende condities en of het schematiseren van objecten e.d. door extra ruwheid het hydraulische proces goed beschrijft.

4. Overlaatformulering

In het model worden zomerkades en dammetjes, scheidingslijnen tussen plassen, bodemsprongetjes en andere lijnsegmenten in het winterbed vertaald naar overlaten. Daardoor ligt het modelwinterbed vol met overlaten die het stroombeeld tijdens hoogwater sterk kunnen beïnvloeden.

Ook kribben worden als overlaten gemodelleerd. Maatregelen als verlaging, verlenging of verkorting van de kribben worden toegepast voor groepen van kribben, niet voor afzonderlijke kribben.

In de overlaatformulering is er een aantal onzekerheidsbronnen:

- a) Onzekerheid in het bepalen van het energieverlies van de overlaten en het effect hiervan op de stroming

Het energieverlies van een overlaat is afhankelijk van de stroomsnelheid boven de overlaat. Het energieverlies kan in WAQUA worden bepaald met een Tabellenboek van Rijkswaterstaat (1973) of de formule van Carnot of een combinatie van beide. Het energieverlies wordt vertaald naar een extra ruwheid in de gridcel waar de overlaat is geschematiseerd bovenop de originele ruwheid van bijvoorbeeld de uiterwaardvegetatie. De totale Chézy coëfficiënt is gelijk aan

$$\frac{1}{C_{\text{totaal}}^2} = \frac{1}{C_{\text{basis}}^2} + f(w, u, v, \alpha) \frac{1}{C_{\text{extra}}^2}$$

met f een functie van de stroomsnelheid w boven de overlaat, de stroomsnelheid u en v in x - en y -richting, en de hoek α van de overlaat ten opzichte van de x -as. De Chézy coëfficiënt C_{extra} is omgekeerd evenredig met het energieverlies. Het tabellenboek en de formule van Carnot, zijn gebaseerd op experimenten waarin over de gehele breedte van een laboratoriumgoot de stroming wordt beïnvloed door een overlaat. In werkelijkheid is er bij een overlaat echter niet altijd sprake van beïnvloeding over de volledige breedte van de stroming. Een krib zal bijvoorbeeld maar gedeeltelijk de stroming beïnvloeden, de stroming kan er immers gedeeltelijk langs gaan. Energieverliezen door overlaten worden daardoor in het model overschat. Als gevolg hiervan wordt de totale ruwheid overschat (en dus de Chézy coëfficiënt onderschat).

Daarnaast wordt er, ook als er sprake is van een verwaarloosbaar klein energieverlies, altijd een minimum energieverlies voor een overlaat in het model verwerkt.

- b) Onzekerheid in het effect van overlaten op de stroming door beperkte kennis van stroming over overlaten met een scheve aanstroming (Mosselman et al., 2005).

Met name de onzekerheid in punt a) kan van invloed zijn op de MHW-berekening. In de kalibratiefase wordt het model afgeregeld op de zomerbedruwheid. Als de ruwheid in de uiterwaard en het kribvak wordt overschat, dan zal de gekalibreerde ruwheid in het zomerbed lager uitvallen dan in het echt. De berekende absolute waterstanden zullen dan onderschat worden.

Bovendien geldt dat fouten door de overlaatformulering in het aangepaste model niet worden gecompenseerd door kalibratie.

5. Invloed gridresolutie op modelschematisatie

De gridresolutie van het model bepaalt de mate van detail die in de modelschematisatie kan worden verwerkt. Zo is de gridresolutie bepalend hoe gedetailleerd bijvoorbeeld nevengeulen in uiterwaarden kunnen worden geschematiseerd.

Daarnaast heeft de gridresolutie ook invloed op de wijze waarop kribben als overlaten op lijnen van het rekenrooster zijn gedefinieerd. Kribben bestrijken altijd een geheel aantal gridcellen. Verhogingen en verlagingen van de kribben kunnen rechtstreeks in het model worden aangebracht. Verlengingen en verkortingen van de kribben zijn echter alleen mogelijk in stappen die overeenkomen met de breedtes van rekencellen. Het effect van verlengingen en verkortingen over tussenliggende afstanden moet benaderd worden door middel van equivalente verhogingen of verlagingen van de kribben.

Grote bodemsprongen ter plaatse van plassen in de uiterwaarden worden bij een lage resolutie niet meegenomen in de bodemschematisatie. Deze zijn daarom als overlaten in het model opgenomen, om zodoende toch de scherpe overgang mee te nemen in de modelschematisatie.

Op een fijn rooster worden de taluds van kleine dijkjes en wegen vertaald in twee parallelle overlaatjes, hetgeen de waterbeweging bij deze dijkjes waarschijnlijk niet goed beschrijft (Mosselman et al., 2005).

6. Fouten in modelschematisatie

Deze onzekerheidsbron betreft fouten die incidenteel in de modelschematisatie worden gemaakt, zoals fouten in de bodemschematisatie, de hoogte van dammetjes en kaden, de vegetatie in uiterwaarden (heggen en struweelrijen). De modelleur is zich vaak niet bewust van deze fouten. De fouten in modelschematisatie kunnen (als ze er zijn) zowel voorkomen in de referentieschematisatie als in de schematisatie voor de RvdR maatregelen en zodoende doorwerken in een onzeker waterstandseffect.

Bij deze onzekerheidsbron geldt overigens dat de invloed van een fout in de schematisatie rechtstreeks doorwerkt in het waterstandseffect, zonder demping van een 'nieuwe' kalibratie. Het gaat immers om fouten die niet bekend zijn, om een schematisatie die voor 'waar' wordt aangenomen.

7. Vorm afvoergolf

Het hydraulische effect van rivierverruimende maatregelen wordt vaak op basis van een constante afvoer bepaald, in plaats van een afvoergolf. Daarbij is voor de Rijntakken aangenomen dat de invloed van de rivierverruimende maatregelen op de topvervlakking verwaarloosbaar is.

De invloed van deze aanname op de waterstandseffecten is waarschijnlijk klein, gezien de beperkte topvervlakking op de Rijntakken.

Onzekerheidsbronnen gerelateerd aan de computerimplementatie van het model zijn:

1. Numerieke implementatie van de analytische vergelijkingen die het proces beschrijven
 - a) keuze numeriek schema
 - b) numerieke afbreekfouten
2. Bugs in de modelsoftware
 Deze onzekerheid is van invloed op de betrouwbaarheid van de modelresultaten als de bugs juist relevant zijn in óf het referentiemodel óf het aangepaste model. In het aangepaste model geldt bovendien dat fouten door bugs niet worden gereduceerd door kalibratie.

Invloed per maatregel en riviertak

De grootte van de invloed van de onzekerheid over de modelstructuur is geschat door de geraadpleegde deskundigen (Bijlage B). De hierboven gegeven beschrijvingen van de onzekerheden ondersteunen deze schattingen.

Vanwege de beperkte beschikbaarheid van gegevens en de globale en subjectieve aard van de schattingen is geen onderscheid gemaakt naar riviertak. Als de (belangrijkste) onzekerheidsbronnen verder worden onderzocht (met modelberekeningen, metingen, of schaalmodellen) zal waarschijnlijk blijken dat de verschillende karakteristieken van de Rijntakken wel invloed hebben op de manier waarop de onzekerheden doorwerken in de waterstandseffecten.

Tabel 3-5 Overzicht van geschatte invloed van elke onzekerheid over de modelstructuur op de *effecten* van elk van de maatregelen (geen = verwaarloosbaar effect, klein = bandbreedte < 10% van berekende effect, matig = 10-50% van berekende effect, groot = bandbreedte > 50% van berekende effect).

Maatregel	Proces- beschrijving	Formulering ruwheid zomerbed	Formulering ruwheid winterbed	Overlaat- formulering	Grid- resolutie	Fouten schematisatie	Vorm afvoer- golf	Imple- menta- tie
uiterwaardplan zonder afgraving	matig	matig	matig	matig	matig	matig	klein	geen
uiterwaardplan met afgraving	matig	matig	matig	matig	matig	matig	klein	geen
kribverlaging	matig	matig	klein	groot	matig	klein	geen	geen
grootschalige dijkverlegging	klein	klein	matig	geen	klein	klein	geen	geen
verwijdering knelpunt	klein	matig	klein	matig	matig	matig	geen	geen
groene rivier	matig	klein	matig	klein	klein	klein	geen	geen
verdieping zomerbed	matig	matig	klein	klein	klein	klein	geen	geen

3.3.3 Onzekerheden gerelateerd aan de modelinvoer

Er wordt onderscheid gemaakt in twee categorieën:

- Onzekerheid door randvoorwaarden
- Onzekerheid in systeemdata

Voor de PKB Ruimte voor de Rivier worden de volgende onzekerheden in de randvoorwaarden onderscheiden:

1. Laterale instroming

Laterale (of zijdelingse) instroming speelt op de meeste Rijntakken nauwelijks een rol. Een uitzondering vormt de IJssel. De laterale instroming vanuit het Twentekanaal en de Oude IJssel die in de MHW berekeningen wordt gehanteerd is in de orde van 10% van de totale maatgevende afvoer door de IJssel (Ogink, 2003). De laterale instroming wordt mogelijk wat overschat.

Op de waterstandseffecten heeft deze onzekerheid geen invloed, aangezien de laterale instroming niet door de maatregelen beïnvloed wordt.

2. Waterstand-afvoerrelaties op benedenstroomse modelranden

Waterstand-afvoerrelaties (Q-h relaties) zijn afgeleid uit metingen, zoals waterstandmetingen, snelheidsmetingen en ingemeten dwarsdoorsneden van de rivier. Onzekerheden zijn enerzijds afkomstig van meetfouten, anderzijds is de rivier continu in ontwikkeling en verandert het doorstroomprofiel in de tijd (autonome bodemdaling, het neerslaan van fijn sediment op uiterwaarden tijdens hoogwater, menselijke ingrepen, etc.).

Omdat de rivierverruimende maatregelen buiten de invloedssfeer liggen van de benedenstroomse randvoorwaarden hebben de Q-h relaties op die modelranden geen invloed op de waterstandseffecten.

Onzekerheidsbronnen in systeemdata hebben betrekking op de gegevens waarmee het systeem wordt beschreven. Meetonnauwkeurigheid, de representativiteit van gegevens en gebrek aan kennis over het systeem spelen hier een rol. De volgende onzekerheidsbronnen worden onderscheiden:

1. Riviergeometrie

Deze bron van onzekerheid is afkomstig uit onnauwkeurigheden in topografische kaarten en bodempeilingen, die gebruikt zijn voor bijvoorbeeld de bodemschematisatie en de positionering en hoogte van kades en dijken.

De onzekerheid in de beschrijving van de riviergeometrie is klein, omdat nauwkeurige kaarten en peilingen beschikbaar zijn. Wel is het zo, dat waar fouten in de geometrie worden vervangen door bijvoorbeeld vergravingen, het waterstandseffect in zeer beperkte mate onder- of overschat wordt. In het geval van forse fouten is de invloed ook groot, maar de kans dat dit voorkomt is klein.

2. Ruwheid winterbed (k-waardes)

Ook als we aannemen dat de formulering van de ruwheid in het winterbed correct is zijn de ingevoerde k -waardes onzeker:

- a) Onzekerheid in vegetatiekartering en ecotopenverdeling in de uiterwaard,
- b) Onzekerheid in k -waarden die zijn afgeleid uit veldmetingen per vegetatietype.

Invloed per maatregel en riviertak

De grootte van de invloed van de onzekerheid over de modelinvoer is geschat door de geraadpleegde deskundigen (Bijlage B). De hierboven gegeven beschrijvingen van de onzekerheid ondersteunen deze schattingen.

Vanwege de beperkte beschikbaarheid van gegevens en de globale en subjectieve aard van de schattingen is geen onderscheid gemaakt naar riviertak. Voor de invloed van onzekerheid in de laterale instroming is het wel duidelijk dat deze bron alleen geldt voor de IJssel. Op andere Rijntakken is geen sprake van significante laterale instroming.

Ook hier geldt dat als de (belangrijkste) onzekerheidsbronnen verder worden onderzocht (met modelberekeningen, metingen, of schaalmodellen) waarschijnlijk zal blijken dat de verschillende karakteristieken van de Rijntakken wel invloed hebben op de manier waarop de onzekerheden doorwerken in de waterstandseffecten.

Tabel 3-6 Overzicht van geschatte invloed van elke onzekerheid over de modelinvoer op de *effecten* van elk van de maatregelen (geen = verwaarloosbaar effect, klein = bandbreedte < 10% van berekende effect, matig = 10-50% van berekende effect, groot = bandbreedte > 50% van berekende effect).
 * Speelt alleen een rol op de IJssel.

Maatregel	Laterale instroming*	Qh relaties	Rivier-geometrie	Winterbed-ruwheid
uiterwaardplan zonder afgraving	geen	geen	geen	matig
uiterwaardplan met afgraving	geen	geen	geen	matig
kribverlaging	geen	geen	geen	klein
grootschalige dijkverlegging	geen	geen	geen	matig
verwijdering knelpunt	geen	geen	geen	klein
groene rivier	klein	geen	geen	matig
verdieping zomerbed	klein	geen	geen	klein

3.3.4 Discussie naar aanleiding van de onzekerheidsmatrix

De bronnen van onzekerheid zijn nu geïventariseerd en bovendien is geschat welke daarvan met name belangrijk zijn voor de onzekerheid in de waterstandseffecten per type maatregel. Het is interessant om de onzekerheidsmatrix (Bijlage C) er nog eens bij te pakken en de classificering van de belangrijkste onzekerheidsbronnen te bespreken.

Op dit moment bestaat de grootste onzekerheid over de overlaatformulering in WAQUA. De onzekerheid over de overlaatformulering in WAQUA is moeilijk te schatten. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk een kansverdeling of interval aan te geven waarmee de onzekerheid wordt beschreven. Verder geldt dat dit een voorbeeld is van onzekerheid door gebrek aan kennis. Er is meer onderzoek nodig om te begrijpen hoe het effect van een overlaat op de stroming het best gemodelleerd kan worden en in hoeverre de huidige aanpak gerechtvaardigd is.

Daarnaast blijkt uit de schattingen in Tabel 3-5 en Tabel 3-6 en uit de discussie in de workshop (Bijlage B) dat de formulering en invoergegevens van de ruwheden in het winterbed gezien worden als belangrijke bron van onzekerheid. Deze hangt direct samen met de ruwheid in het zomerbed, dankzij de manier van kalibreren.

Van de onzekerheid in de hydraulische ruwheid door de winterbedvegetatie is het, zonder geschikte meetgegevens, moeilijk om aan te geven binnen welk (wellicht groot) interval de bijbehorende k -waardes liggen per vegetatietype. Daar is een (subjectieve) schatting op basis van het oordeel van deskundigen voor gegeven. De aard van deze onzekerheid is voor een belangrijk deel 'natuurlijke variabiliteit'. Immers, de weerstand die het rivierwater ondervindt van een type vegetatie hangt af van natuurlijke omstandigheden als de groei van de vegetatie, de samenstelling ervan (hoeveel struiken staan er in natuurlijk grasland?), enzovoort. De consequentie daarvan is, dat deze onzekerheidsbron niet gereduceerd kan worden tot nul, ook niet als er veel onderzoek naar gedaan wordt.

Een 'voordeel' van deze onzekerheidsbron is dat er, na uitvoering van de maatregelen, mogelijkheden zijn om het werkelijke waterstandseffect te beïnvloeden en de onzekerheid over het effect bij MHW's te verkleinen. Dat kan enerzijds door het beheer van de vegetatie in de uiterwaarden te handhaven. Anderzijds kan de onzekerheid over de k -waardes in de modellen gereduceerd worden door in de uiterwaarden te monitoren bij hoogwaters, waarmee de WAQUA-modellen kunnen worden geverifieerd en eventueel opnieuw gekalibreerd.

4 Maatregelen vergeleken vanuit onzekerheidsperspectief

Nu de belangrijkste bronnen van onzekerheid zijn geselecteerd en de invloed van elk is geschat, richten we onze aandacht op de volgende vragen:

- Hoe verschillen de type maatregelen onderling vanuit het oogpunt van onzekerheden?
- Wanneer vormt onzekerheid in de hydraulische effecten een belemmering voor het nemen van beslissingen of het uitvoeren van maatregelen?
- In hoeverre is elk van de geselecteerde onzekerheden met eenvoudige maatregelen te verkleinen?

De schattingen van de grootte van de invloed van elk van de onzekerheidsbronnen op de waterstandseffecten zijn te subjectief en globaal om harde uitspraken te doen over absolute waarden van onzekerheden (Bijlage B). De schattingen geven wel de verhouding aan tussen de invloed van de diverse onzekerheidsbronnen (Tabel 3-5 en Tabel 3-6). Op basis van deze verhoudingen worden de typen maatregelen vergeleken in onzekerheid rond het waterstandseffect.

4.1 Verhouding tussen onzekerheden

Om de typen maatregelen onderling te vergelijken op basis van de onzekerheid in de waterstandseffecten zijn de resultaten in Tabel 3-5 en Tabel 3-6 vertaald naar percentages van onzekerheid in het waterstandseffect:

geen (i.e. niet relevant) => 0%,

klein (i.e. < 10%) => 1% (laag in klasse) of 5% (midden in klasse),

matig (i.e. 10 – 50%) => 10% (laag in klasse) of 30% (midden in klasse), en

groot (>50%) => 50% (laag in klasse) of 70% (hoger in klasse).

Deze percentages moeten worden geïnterpreteerd als verhoudingsgetallen, i.e. ze geven de verhouding aan tussen de invloed van de onzekerheden, niet de absolute waarden. Elk percentage p representeert de helft van de onzekerheidsband rond het berekende waterstandseffect ΔH per maatregel. Dus, het waterstandseffect ligt waarschijnlijk binnen het interval $\Delta H \pm p\%$.

Tabel 4-1 geeft per type maatregel de verhoudingsgetallen voor de onzekerheden in de modelstructuur en -invoer. De onzekerheden die bij voorbaat al als verwaarloosbaar zijn ingeschat zijn niet in de tabel opgenomen.

De laatste regel in Tabel 4-1 geeft de relatieve onzekerheid in elk van de typen maatregelen die resulteert uit de afzonderlijke bijdrages van de onzekerheidsbronnen. Voor het combineren van de afzonderlijke bronnen is een standaard rekenregel uit de kansrekening gebruikt (b.v. Grimmitt en Stirzaker, 1982): de variantie van de bijdrages van alle afzonderlijke bronnen mag worden opgeteld. Daarbij is aangenomen dat (1) alle onzekerheden redelijkerwijs benaderd kunnen worden door een normale kansverdeling, en (2) dat alle onzekerheidsbronnen onderling onafhankelijk zijn van elkaar.

Vertaald naar de relatieve onzekerheden in Tabel 4-1 betekent dit dat de getallen voor de onzekerheidsbronnen per maatregel kwadratisch zijn opgeteld: twee relatieve onzekerheden van 50% en 10% geven samen een relatieve onzekerheid van $(50^2 + 10^2)^{1/2} = 51\%$. De totale relatieve onzekerheden per type maatregel staan in de laatste regel van de tabel.

Tabel 4-1 Tabel met percentages voor de relatieve onzekerheid (t.o.v. het maximale waterstandseffect per maatregel) in de onzekerheidsbronnen, welke geïnterpreteerd moeten worden als verhoudingsgetallen en niet als absolute waarden. De percentages zijn afgeleid uit de schattingen in Tabel 3-5 en, en staan voor de helft van de onzekerheidsband rond de berekende effecten (dus ‘het berekende effect ± percentage’ geeft de band waarbinnen het waterstandseffect waarschijnlijk ligt). De bovenste helft van elke regel geeft een lage schatting, de onderste helft een hogere schatting.

	Uiterwaard- plan zonder afgraving	Uiterwaard- plan met afgraving	Kribver- laging	Dijkver- legging	Verwijdering knelpunt	Groene rivier	Verdieping Zomerbed
laterale instroming						1 5	1 5
ruwheid winterbed (invoer)	10 30	10 30	1 5	10 30	1 5	10 30	1 5
proces- beschrijving	10 30	10 30	10 30	1 5	1 5	10 30	10 30
formulering ruwheid zomerbed	10 30	10 30	10 30	1 5	10 30	1 5	10 30
formulering ruwheid winterbed	10 30	10 30	1 5	10 30	1 5	10 30	1 5
overlaat- formulering	10 30	10 30	50 70		10 30	1 5	1 5
gridresolutie	10 30	10 30	10 30	1 5	10 30	1 5	1 5
fouten in schematisatie	10 30	10 30	1 5	1 5	10 30	1 5	1 5
vorm afvoergolf	1 5	1 5				1 5	
Totale relatieve onzekerheid	26 80	26 80	53 88	14 44	20 61	17 53	14 44

Tabel 4-1 geeft de totale relatieve onzekerheid per type maatregel in ‘verhoudingsgetallen’ voor zowel een lage schatting (bovenste helft van de regels) en een hogere schatting (onderste helft regels). Uit de resultaten in de onderste regel van de tabel blijkt dat de berekende waterstandseffecten

- het minst betrouwbaar zijn voor de kribverlaging,
- gevolgd door de uiterwaardplannen, en
- het meest betrouwbaar zijn voor grootschalige dijkverlegging en verdieping van het zomerbed.

De getallen in Tabel 4-1 geven nog geen informatie over de absolute grootte van de onzekerheidsband per maatregel. Deze hangt af van het berekende effect van een maatregel. Deze vertaling staat – in ordes van grootte – in Tabel 4-2. Daaruit blijkt dat

- in absolute zin de onzekerheid in het effect van de groene rivier het grootst is,
- de onzekerheid in het effect van het verwijderen van een knelpunt in absolute zin klein is, en dat
- de relatieve invloed van dijkverleggingen en zomerbedverdieping ten opzichte van andere typen maatregelen afhangt van de gekozen ‘verhoudingsgetallen’ in Tabel 4-1, en dat
- de relatieve onzekerheid rond de uiterwaardplannen weliswaar verhoudingsgewijs groot is, maar dat de onzekerheid in absolute zin vaak klein zal zijn gezien het vaak beperkte hydraulische effect van de plannen.

Tabel 4-2 Tabel met onzekerheden per type maatregel in absolute zin. Ook hier gaat het om de verhouding tussen de getallen. De waterstandseffecten per maatregel geven de orde van grootte aan, in hele centimeters.

	Uiterwaard- plan zonder afgraving	Uiterwaard- plan met afgraving	Kribver- laging	Dijkver- legging	Verwijdering knelpunt	Groene rivier	Verdieping Zomerbed
waterstands- effect [cm]	10	10	10	30	10	60	20
relatieve onzekerheid	26% 80%	26% 80%	53% 88%	14% 44%	20% 61%	17% 53%	14% 44%
absolute onzekerheid [cm]	3 8	3 8	5 9	4 13	2 6	10 32	3 9

4.2 Mogelijkheid tot reductie van onzekerheid

Op basis van de geschatte invloed van de onzekerheidsbronnen (Tabel 4-1) valt één bron op door de verhoudingsgewijs grote invloed: de overlaatformulering in WAQUA voor de kribverlagingen.

De onzekerheid over de overlaatformulering kan worden verkleind door verder onderzoek te doen naar deze formulering in WAQUA. Uit dit onderzoek kan blijken dat de twijfels over de formulering onterecht zijn, waarmee bijvoorbeeld het berekende effect van kribverlagingen beter is onderbouwd. Als blijkt dat de twijfels wel verder kunnen worden onderbouwd, betekent dit waarschijnlijk dat het werkelijke waterstandseffect van kribverlaging kleiner is dan tot nu toe aangenomen. Voor kribverlaging geldt dat een eventueel tegenvallend effect na uitvoering van de maatregel moeilijk vergroot kan worden. Nader onderzoek is daarom nodig.

De onzekerheid in het effect van de groene rivier blijkt in absolute zin het grootst te zijn (Tabel 4-2). Deze onzekerheid komt voort uit drie bronnen met een 'matige invloed'. Een groot deel van deze onzekerheid komt voort uit beperkte kennis over de juistheid van formuleringen in de WAQUA modellen (procesbeschrijving en formulering winterbedruwheid). Het vertrouwen in de modelresultaten kan worden vergroot door met name aan deze formuleringen meer aandacht te schenken in verder onderzoek. Afwijkingen van het berekend effect kunnen deels door een strikt 'vegetatiebeleid' worden gecontroleerd. In geval van een groene rivier zijn er, na uitvoering, weinig gelegenheden om het effect te monitoren. Immers, volgens het ontwerp wordt de groene rivier zelden ingezet om een waterstandsval te bewerkstelligen. Het gevaar bestaat dat in de loop der tijd, de inrichting van het binnendijkse gebied dat de groene rivier inneemt (denk aan natuur, gewassen, hekjes en andere infrastructuur) niet geheel conform het originele ontwerp plaatsvindt. Met het oog op eventuele ruwheidsverhogingen als gevolg hiervan is een strikt vegetatiebeleid zeer belangrijk.

5 De maatregelen gecombineerd

5.1 Inleiding

Het uiteindelijke doel van deze studie is zicht te krijgen op de onzekerheid in het waterstandseffect langs de Rijntakken van het Bovenrivierengebied, voor het totaalpakket aan rivierverruimende maatregelen dat in de lopende en recent uitgevoerde projecten en in het VKA is opgenomen. Met andere woorden, we willen een *eerste* uitspraak doen over de onzekerheid in het hydraulische effect langs de rivier dat met de complete set van maatregelen wordt beoogd.

De vragen die we in dit onderdeel van de studie stellen zijn:

- Hoe combineren we de bandbreedtes per type maatregel (in diverse riviertrajecten) tot een bandbreedte rond het hydraulisch effect langs een hele riviertak, waarin alle maatregelen uit het VKA zijn gecombineerd?
- Wat kunnen we concluderen over het al dan niet toereikend zijn van het VKA vanuit het perspectief van onzekerheden?

De vraag hoe de bandbreedtes per type maatregel uit het vorige hoofdstuk kunnen worden vertaald naar een bandbreedte rond het hydraulisch effect langs een hele riviertak wordt besproken in paragraaf 5.2. Vanwege het globale karakter van de schattingen is met de opdrachtgever afgesproken geen kwantitatieve uitspraken te doen.

5.2 Bandbreedte rond hydraulisch effect bij VKA

Voor het bepalen van de onzekerheid in het waterstandseffect langs de rivier voor het totaalpakket aan maatregelen van het VKA spelen twee punten een rol. Ten eerste is het van belang of de verschillende onzekerheidsbronnen die het waterstandseffect van een bepaald type maatregel beïnvloeden volledig afhankelijk of onafhankelijk van elkaar zijn. Voor deze studie gaan we uit van onafhankelijkheid. Ten tweede hebben de rivierverruimende maatregelen een plaatselijk waterstandsverlagend effect. Dit effect werkt in bovenstroomse richting door als gevolg van het stuwkromme effect. Indien het waterstandseffect onzeker is, is ook de mate waarin bovenstroomse waterstanden worden beïnvloed door het stuwkromme-effect onzeker.

Met betrekking tot het stuwkromme-effect is aangenomen dat de (absolute) onzekerheid in bovenstroomse richting afneemt. Voor het afschatten van de mate waarin waterstandseffecten in de bovenstroomse richting doorwerken wordt vaak gebruik gemaakt van de eerste orde benadering van Bélanger. We gaan ervan uit dat de mate waarin de onzekerheid in het stuwkromme-effect doorwerkt in bovenstroomse richting op dezelfde wijze kan worden bepaald.

Bélanger benadert het stuweffect Δh_L dat bij een M1-stuwkromme op afstand L van een verstoring van Δh_0 overblijft met:

$$\Delta h_L \approx \Delta h_0 \cdot e^{\left(-\frac{3i_b L}{h_c(1-Fr)}\right)} \approx \Delta h_0 \cdot e^{\left(-\frac{L}{\lambda}\right)}$$

waarin het Froude getal Fr veel kleiner is dan 1 (5-1)

$$\lambda = \frac{h_c}{3i_b}$$

met:

- Fr het Froude getal
- i_b het bodemverhang
- h_c de evenwichtswaterdiepte
- λ de karakteristieke stuwkromme lengte

Schattingen voor de karakteristieke aanpassingslengten in de Boven-Rijn, de Waal, de IJssel, het Pannerdensch Kanaal en de Neder-Rijn en Lek staan in Tabel 5-1. In principe is de evenwichtswaterdiepte locatieafhankelijk en variëren de aanpassingslengten langs de rivier. Natuurlijk moeten we ons ook realiseren dat als gevolg van variabele afvoer een evenwichtsdiepte nooit wordt gerealiseerd.

Tabel 5-1 Globale schattingen voor de karakteristieke aanpassingslengten in de Boven-Rijn, de Waal, de IJssel, het Pannerdensch Kanaal en de Neder-Rijn en Lek (informatie van rivierverhang en evenwichtsdiepte is afkomstig uit Visser, 2000) (* gemiddelde evenwichtsdiepte behorend bij de afvoer die 50% van de tijd wordt onderschreden).

karakteristiek	Rijntakken				
	Boven-Rijn	Waal	Pannerdensch Kanaal	Neder-Rijn & Lek	IJssel
verhang	0,1 m/km	0,12 m/km	0,04 m/km	0,15 m/km	0,11 m/km
evenwichtsdiepte	6 m	6 m	4,5 m	5 m	4,5 m
aanpassingslengte	20 km	18 km	38 km	11 km	14 km

De invloed van een verstoring neemt volgens Bélanger exponentieel met de afstand tot die verstoring af. In theorie is de afstand van de bovenstroomse locatie tot de verstoring waar nog 5% van het effect van verstoring over is gelijk aan drie maal de aanpassingslengte. Dit zijn dus grote afstanden op de Rijntakken.

Met behulp van bovenstaande theorie kan worden bepaald hoe de totaalonzekerheid per maatregel langs de Rijntakken doorwerkt in bovenstroomse richting. Om de onzekerheden per maatregel te combineren tot één onzekerheidsband worden per rivierkilometer de som van de kwadraten van de bijdrages bij elkaar opgeteld, analoog aan de optelling in Tabel 4-1.

Omdat de geschatte invloed van de onzekerheidsbronnen geen harde kwantitatieve getallen heeft opgeleverd worden hier geen resultaten gepresenteerd van onzekerheidsbanden langs de Rijntakken.

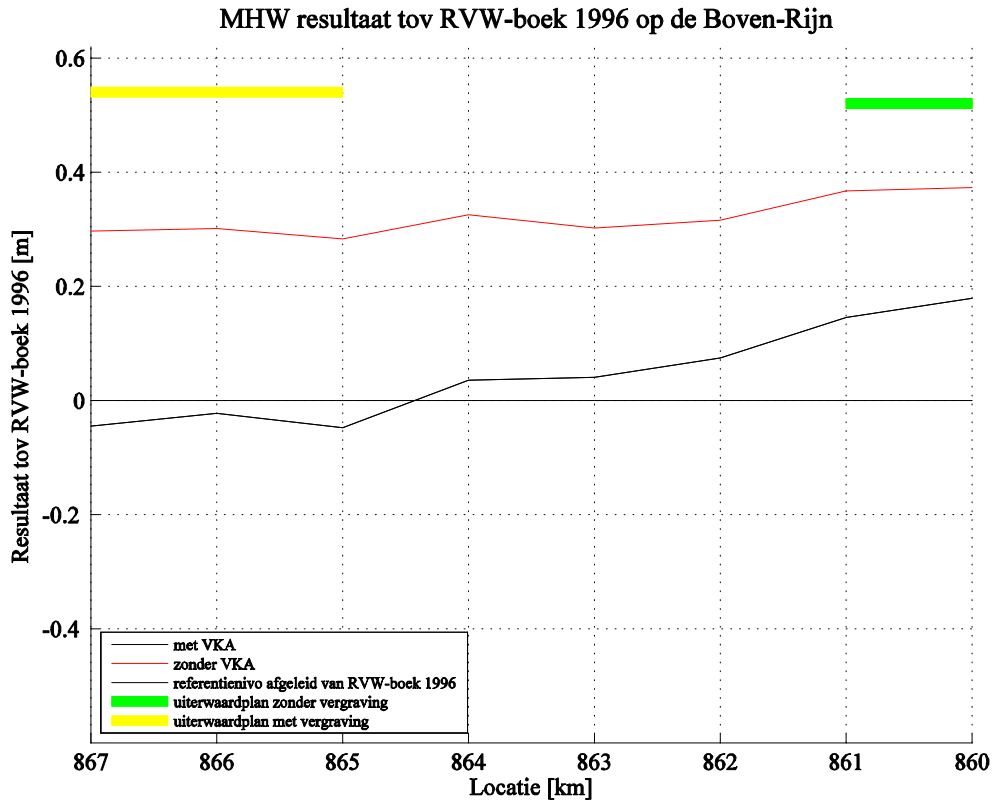
5.3 Het VKA vanuit het perspectief van onzekerheid

In Hoofdstuk 4 is besproken hoe de onzekerheden in de hydraulische effecten van de typen maatregelen zich tot elkaar verhouden, in relatieve en in absolute zin. Ook zonder de schattingen als harde kwantitatieve schattingen te zien, kunnen conclusies getrokken worden over de zekerheid waarmee de taakstellingen van de PKB RvdR gehaald worden. Daarvoor geven Figuur 5-1 tot en met Figuur 5-5 per riviertak de deterministische MHW-en ten opzichte van de taakstelling, inclusief een overzicht van de typen maatregelen per tak. In Bijlage A staan de waterstandseffecten voor de maatregelen, die in de lopende en recent uitgevoerde projecten en in het VKA per riviertak zijn voorgesteld. Zo kan per maatregel een link worden gelegd tussen de concrete maatregel, relatieve onzekerheid en onderstaande plaatjes.

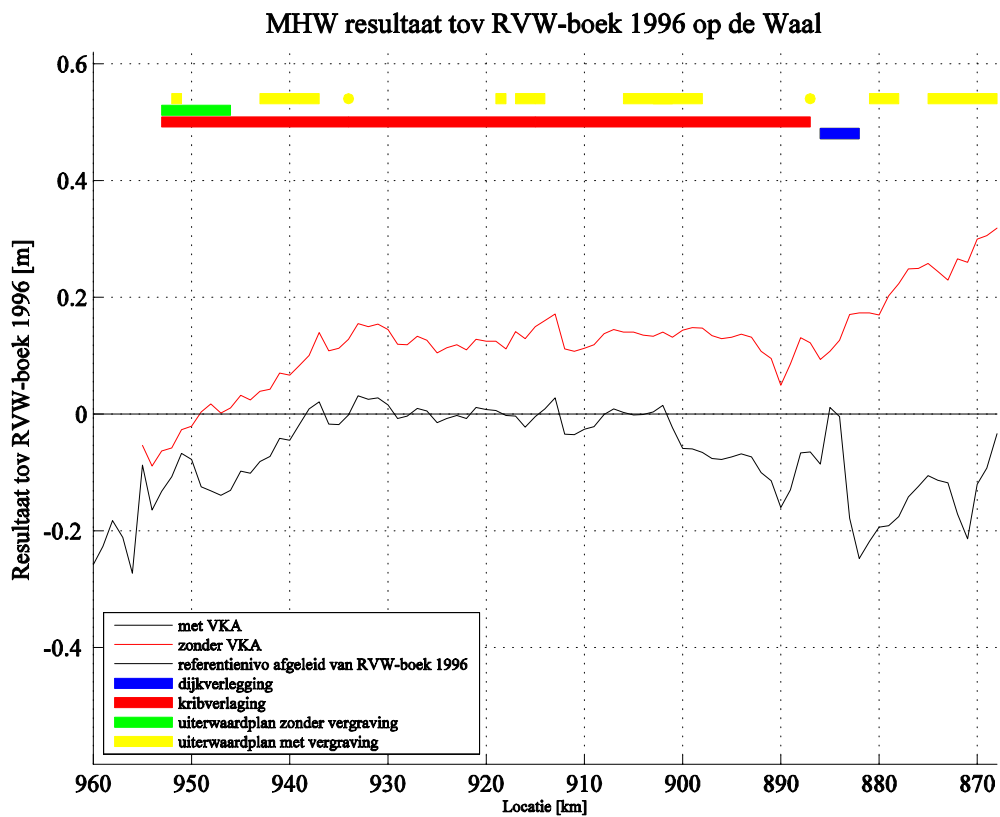
Het volgende valt op:

- In Hoofdstuk 4 is geconcludeerd dat de groene rivier langs de IJssel in absolute zin de grootste bijdrage aan de totale onzekerheid rond het hydraulisch effect van het VKA geeft. Onderstaande figuur van de IJssel laat zien dat juist deze maatregel voor een grote waterstandsdeling zorgt (kvr 960-972), zodat de taakstelling ruimschoots wordt gehaald. De consequentie is dat ook een forse onzekerheid op dit traject geen problemen zal geven voor de veiligheid. Merk op dat op basis van deze studie geen garantie wordt gegeven dat de onzekerheid niet inderdaad zo groot is dat hier van uit kan worden gegaan.
- Andersom geldt voor de trajecten waarop de taakstelling maar net gehaald wordt, dat de onzekerheid over de waterstandseffecten maar klein hoeft te zijn om vraagtekens te stellen bij het daadwerkelijk halen van die taakstelling. Dit geldt zeker gezien de nauwkeurigheid in de orde van centimeters waarin momenteel de taakstelling wordt gehandhaafd.

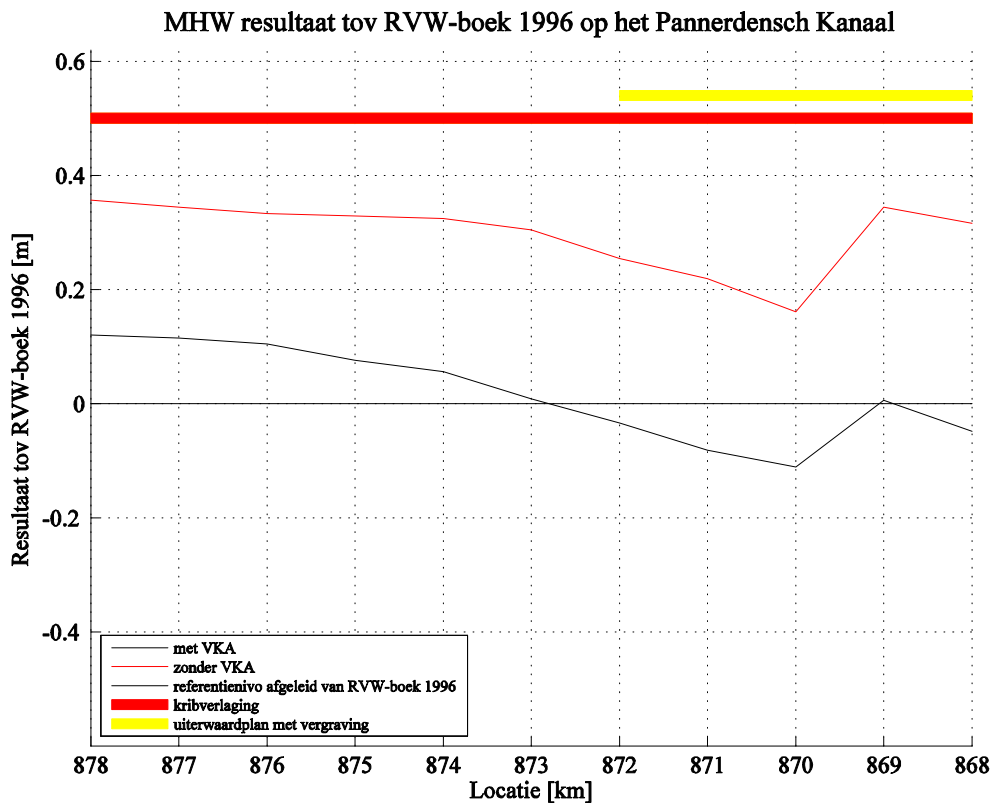
De conclusie is dan ook dat pas bepaald kan worden welke trajecten van de Rijntakken zorgen baren wat betreft de betrouwbaarheid van de waterstandseffecten als de kwantitatieve schattingen van de onzekerheid gecombineerd worden met de verwachte waterstandseffecten.



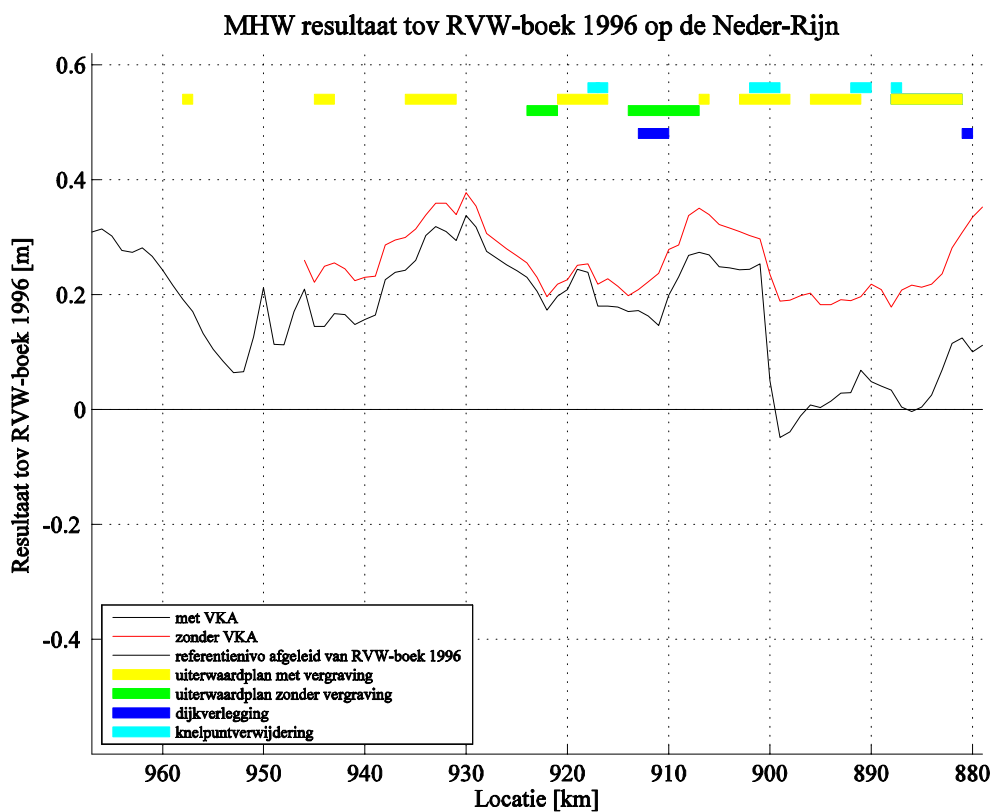
Figuur 5-1 MHW-en ten opzichte van het Randvoorwaardenboek 1996 op de Boven-Rijn



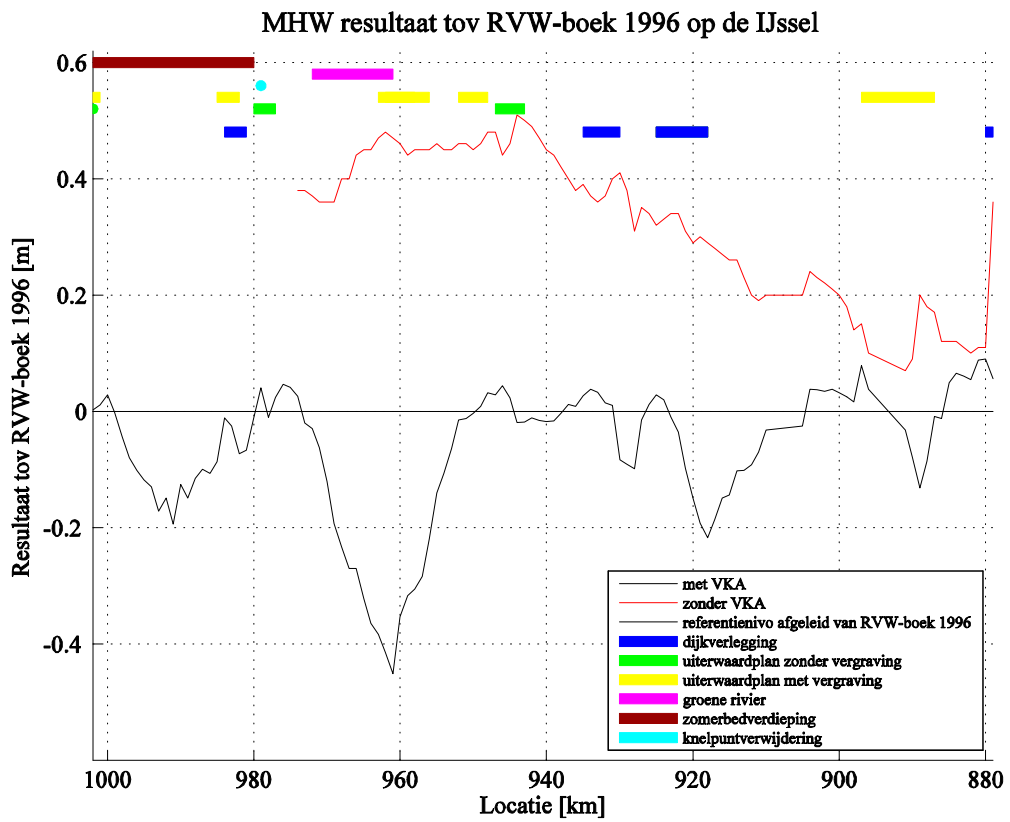
Figuur 5-2 MHW-en ten opzichte van het Randvoorwaardenboek 1996 op de Waal



Figuur 5-3 MHW-en ten opzichte van het Randvoorwaardenboek 1996 op het Pannerdensch Kanaal



Figuur 5-4 MHW-en ten opzichte van het Randvoorwaardenboek 1996 op de Neder-Rijn



Figuur 5-5 MHW-en ten opzichte van het Randvoorwaardenboek 1996 op de IJssel

6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

6.1 Discussie over ‘onzekerheden in de context’

In Paragraaf 3.3.1 zijn de onzekerheden geïnventariseerd en beschreven die zich manifesteren in de context van de modellen en de uitgangspunten van de PKB RvdR. Ondanks het feit dat deze onzekerheidsbronnen strikt genomen niet van toepassing zijn op het doel van deze studie gaat deze paragraaf er kort op in.

Tabel 6-1 geeft een globale schatting van de invloed van deze onzekerheden op de waterstandseffecten per type maatregel. Ook deze schattingen komen voort uit de workshop die voor deze studie is gehouden (Bijlage B).

Tabel 6-1 Overzicht van geschatte invloed van elke onzekerheid in de context van de modellen op de effecten van elk van de maatregelen (geen = verwaarloosbaar effect; klein = bandbreedte < 10% van berekend effect, matig = 10 – 50% van berekende effect; groot = bandbreedte > 50% van berekende effect).

Maatregel	Morfo-dynamiek	Afvoerverdeling op splitsingspunten	Menselijk handelen	Beheer uitgevoerde maatregelen
uiterwaardplan zonder afgraving	klein	matig	klein	matig
uiterwaardplan met afgraving	klein	matig	klein	matig
kribverlaging	klein	klein	klein	klein
grootschalige dijkverlegging	klein	matig	klein	klein
verwijdering knelpunt	klein	klein	klein	klein
groene rivier	klein	klein	matig	matig
verdieping zomerbed	klein	klein	klein	matig

In de taakstelling van de PKB RvdR staat dat de afvoerverdeling over de splitsingspunten niet mag wijzigen als gevolg van de rivierverruimende maatregelen. In het kader van onzekerheid in de waterstandseffecten is de vraag echter van belang in hoeverre met zekerheid aan deze eis voldaan kan worden. Zo is het bijvoorbeeld nog niet bekend in hoeverre morfologische effecten van maatregelen in de buurt van de splitsingspunten de afvoerverdeling kunnen beïnvloeden.

Voor deze onzekerheidsbron geldt dat het maatregelenpakket VKA als geheel moet worden beschouwd. Enerzijds voor het bepalen of de afvoerverdeling inderdaad ongewijzigd blijft. Anderzijds voor de invloed van een eventuele wijziging op de waterstandseffecten. Immers, als de afvoerverdeling verandert beïnvloedt dit de waterstandseffecten van *alle* maatregelen. Voor de takken die meer water te verwerken krijgen zijn de waterstandseffecten kleiner dan verwacht, terwijl voor de takken die minder water krijgen de effecten groter zijn dan verwacht.

De onzekerheid in het menselijk handelen is in het bijzonder relevant voor de groene rivier langs de IJssel. Immers, deze maatregel is bedoeld om slechts sporadisch ingezet te worden middels een inlaatwerk. Er zal dus weinig ervaring worden opgedaan met beslissen of de maatregel wordt ingezet en vervolgens met het daadwerkelijk inzetten ervan. Fouten of vergissingen, of problemen rond het nemen van de beslissing, liggen dus op de loer. Het al dan niet tijdig inzetten van deze maatregel bepaalt of het verwachte waterstandseffect daadwerkelijk bereikt wordt. Een extra aandachtspunt hier is, dat juist deze maatregel een aanzienlijke bijdrage levert aan het totale waterstandseffect van het VKA op de IJssel.

Onzekerheid rond het beheer van de maatregelen als ze eenmaal zijn uitgevoerd wordt gezien als belangrijk, met name voor de uiterwaardplannen, de groene rivier en de zomerbedverdieping. In het laatste geval gaat het om regelmatig baggeronderhoud. Daarmee is ook nu al veel ervaring opgebouwd. Verondersteld mag worden dat deze ervaring helpt om het beheer van de zomerbedverdiepingen effectief vorm te geven. Voor de uiterwaardplannen en de groene rivier gaat het om het beheer van de ruwheid: vegetatie en ook hekjes, heggetjes, etc. Hierbij is er een belangrijk verschil tussen de twee type maatregelen. Voor de uiterwaardplannen geldt dat er met enige regelmaat een overstroming van de betreffende uiterwaarden zal zijn. Zeker als daarvan gebruik wordt gemaakt voor meetcampagnes biedt dat de mogelijkheid om ervaring op te doen met de invloed van veranderende ruwheid op de waterstanden. Het beheer van deze uiterwaarden kan daarmee vorm gegeven worden. Bovendien blijft het waarschijnlijk lange tijd duidelijk waarom de ruwheid beheerd moet worden, daar wordt om de paar jaar weer op gewezen door hoge waterstanden. Anders ligt het voor de groene rivier, welke slechts sporadisch zal worden ingezet. Ook in deze nieuwe 'riviertak' zal vegetatie ontstaan en na verloop van tijd zullen er hekjes en andere infrastructuur worden aangelegd. De invloed hiervan op de waterstanden kan nauwelijks worden getest. Bovendien bestaat de kans dat de noodzaak van het beheren van deze maatregel vervaagd als het lang duurt voordat de groene rivier daadwerkelijk wordt ingezet.

De seizoensvariatie in de vegetatie in het winterbed komt niet als onzekerheidsbron voor in Tabel 6-1. Zowel in het kader van de PKB RvdR als breder bij het bepalen van de MHW's wordt aangenomen dat een extreem hoogwater in de winter plaatsvindt. Daarom is in de WAQUA modellen ook uitgegaan van wintervegetatie. Als, echter, een hoogwater in bijvoorbeeld het voorjaar plaatsvindt heeft de vegetatie op de uiterwaarden een wezenlijk ander karakter. Het rivierwater zal er meer weerstand door ondervinden, waardoor de afvoerverdeling over het zomer- en winterbed anders zal zijn. Dat heeft als consequentie dat de absolute waterstanden zullen afwijken van de officiële MHW's, en bovendien dat het effect van de maatregelen anders zal zijn. Het verdient aanbeveling om in het veiligheidsbeleid met deze mogelijkheid rekening te houden.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van deze studie zijn geen harde conclusies te trekken over het al dan niet problematisch zijn van de onzekerheid rond de waterstandseffecten van het VKA. Immers, de schattingen van de invloed van de afzonderlijke onzekerheidsbronnen zijn daarvoor te globaal en subjectief. Om meer te kunnen zeggen op dit punt adviseren we het volgende:

- Besteed meer aandacht aan de onzekerheid rond de overlaatformulering in WAQUA. De deskundigen gaven aan hierover bezorgd te zijn. Op dit onderwerp is recentelijk onderzoek uitgevoerd, onder andere bij WL. Het is verstandig om de deskundigen op dit gebied een overzicht te vragen van de laatste stand van kennis hierover en waar de grootste kennis ontbreekt. Daarnaast kan dan meer onderzoek worden gedaan met bijvoorbeeld schaalmodelonderzoek. Hierbij merken we op dat in dit geval de onzekerheid niet normaal verdeeld is. De zorg is juist dat waterstandseffecten van bijvoorbeeld kribverlaging worden overschat door de gebrekkige overlaatformulering. De kans is dus groot dat het effect van deze maatregel in de praktijk tegenvalt.
- De combinatie van onzekerheid over de ruwheid in het zomer- en winterbed is de tweede grote zorg op dit moment. Vanwege de kalibratieprocedure die voor de WAQUA-modellen wordt gehanteerd zijn deze onzekerheden sterk aan elkaar gerelateerd. Om meer kwantitatief inzicht te krijgen in de mate waarin variaties in de winterbedruwheid de waterstandseffecten beïnvloeden is het raadzaam om modelsimulaties uit te voeren. Om beter inzicht te krijgen in de grootte van de onzekerheid die voortkomt uit de formulering van de ruwheden in WAQUA is uitgebreider onderzoek nodig. Het onderzoek dat momenteel in het kader van een VICI programma wordt uitgevoerd aan de Universiteit Twente (o.l.v. prof.dr.ir. Hulscher) sluit hier op diverse manieren bij aan. Bovendien is er behoefte aan betrouwbare metingen van stroomkarakteristieken in uiterwaarden langs de Rijntakken.

De behoefte om meer onderbouwing te vinden en te creëren voor de invloed van de onzekerheidsbronnen die in deze studie zijn geïnventariseerd is duidelijk en begrijpelijk. Met meer onderzoek en meetcampagnes is dit ook mogelijk. Echter, het is een illusie om aan te nemen dat alle onzekerheden binnen afzienbare tijd met harde objectieve getallen onderbouwd kunnen worden. Uit deze studie blijkt dat een belangrijk deel van de onzekerheid voortkomt uit beperkte kennis over diverse formuleringen in de WAQUA modellen. Deze formuleringen zijn echter gebaseerd op jarenlang onderzoek en inzicht waaraan niet ineens snel veel verbeterd zal worden. Dat is een langzaam proces.

Het blijft voor de PKB RvdR dus een uitdaging om om te gaan met onzekerheden die niet hard kwantitatief onderbouwd kunnen worden.

Het durven aanwijzen van trajecten langs de Rijntakken waarin onzekerheid het grootste probleem vormt voor het halen van de taakstelling heeft als belangrijke voordeel dat er in het beheer van de maatregelen en de manier van uitvoeren al rekening mee gehouden kan worden. Met name het beheer van de vegetatie in uiterwaarden is in deze studie genoemd als concrete optie.

Door meetcampagnes voor te bereiden en uit te voeren in de periode voor en na uitvoering van de maatregelen kan ook de onzekerheid verkleind worden. Daarmee kunnen immers de WAQUA modellen geverifieerd worden en eventueel verbeterd. Dat geeft dus ook straks nog concrete mogelijkheden om 'om te gaan met onzekerheid'.

7 Referenties

- Duits, M. T. & J. M. van Noortwijk, 1999. Nauwkeurighedsanalyse Ruimte voor Rijntakken. Rapport PR163, HKV Lijn in water
- Grimmett G.R. en D.R. Stirzaker, 1982. Probability and random processes. Oxford science publications, Oxford. ISBN 0-19-853185-0.
- HKV en WL, 2003. Beperking van overstromingsrisico's in het Bovenrivierengebied. Een verkennende beleidsanalyse van rampenbeheersing en structurele maatregelen langs de Rijntakken en de Maas. Opdrachtgever Rijkswaterstaat RIZA. HKV Lijn in Water en WL | Delft Hydraulics, PR640.
- Klis, H. van der, 2003. Uncertainty analysis applied to numerical models of river bed morphology. Proefschrift, ISBN 90-407-2440-7, Technische Universiteit Delft.
- Klis, H. van der & Schijndel, S.A.H. van, 2005. Zicht op onzekerheden in PKB Ruimte voor de Rivier. Memo WL | Delft Hydraulics.
- Klis, Hanneke van der, Karen Meijer en Saskia van Vuren, 2006. Guidance for Uncertainty Analysis. Part I: Questions to ask, methods for answers. WL | Delft Hydraulics, report Q3435. [in concept]
- Mosselman, E., C.J. Sloff & H.R.A. Jagers (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Voorbereiding. Rapport Q3963.00, WL | Delft Hydraulics.
- Ogink, H. J. M., 2003. Nauwkeurigheid toetspeilen. Rapport Q3634. WL|Delft Hydraulics.
- Ogink, H. J. M., 2006. Onzekerheid afvoerverdeling splitsingspunten Rijn. Rapport Q4207. WL | Delft Hydraulics.
- Rijkswaterstaat, 2006. Kaartenatlas. Project Rampenbeheersingsstrategie Overstromingen Rijn en Maas (RBSO). Coördinatie: Frank Alberts. Rijkswaterstaat RIZA. April 2006.
- Silva, W., Klijn, F., Dijkman, J., 2000. Ruimte voor Rijntakken. Wat het onderzoek ons heeft geleerd. WL | Delft Hydraulics Rapport R3294. RIZA rapport 2000.026. ISBN. 9036953235. in opdracht van Rijkswaterstaat, Directie Oost-Nederland.
- Velzen, E. van, 2003. Nauwkeurigheid toetspeilen. RIZA memo. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Vuren, S. van, 2005. Stochastic modelling of river morphodynamics. Proefschrift, ISBN 90-407-2604-3, Technische Universiteit Delft.
- Vuren, S. van, H. J. de Vriend, M. Kok & S. J. Ouwkerk. Stochastic modelling of the impact of flood protection measures along the river Waal in the Netherlands. *Journal of Natural Hazards*, 36 (1-2), Special issue on Flooding in Europe: Risks and challenges, 81-101.
- Vuuren, W. van, 2003. Een analyse van de spreiding in opgetreden piekwaterstanden tijdens de historische hoogwaters op de Rijntakken over de periode 1901-2001. RIZA memo: WSR 2003-011. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Visser, P. J. , 2000. Bodemontwikkeling Rijnsysteem. Een verkenning van omvang, oorzaken, toekomstige ontwikkelingen en mogelijke maatregelen. Technische Universiteit Delft, Sectie Waterbouwkunde, Civiele Techniek.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A., Janssen, P. & Krayen von Kraus, M. P. , 2003. Defining Uncertainty. *Integrated Assessment*. Vol. 4, No. 1, pp 5-17
- Werner, M., 2004. Spatial flood extent modelling. A performance-based comparison. Proefschrift, ISBN 90-407-2558-6, Technische Universiteit Delft.

A Maatregelen in de lopende en recent uitgevoerde projecten en in het VKA

Maatregelen in het VKA

Maatregel	Tak	Type	Nevengeul	Vergraving	Natuurlijk grasland	Dijkverl.	MHW effect [m]
50009a	Waal	Dijkverlegging					0,270
Krib-W2	Waal	Kribverlaging					0,119
Krib-W3	Waal	Kribverlaging					0,079
Krib-W4	Waal	Kribverlaging					0,053
W45_W48_4a	Waal	Uiterwaardplan	X		X	X	0,090
krib-PK	PK	Kribverlaging					0,073
R09_3	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X	X			0,077
R13_3c	Neder-Rijn	Uiterwaardplan		X			0,013
R22_2	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X		X		0,026
20404c	Neder-Rijn	Dijkverlegging					0,346
R24_1b	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X		X		0,056
37a	Neder-Rijn	Knelpuntverwijdering					0,051
5301b	Neder-Rijn	Knelpuntverwijdering					0,172
50007c	IJssel	Dijkverlegging					0,347
20505d	IJssel	Dijkverlegging					0,279
Y31_Y33_Y34_1a	IJssel	Uiterwaardplan	X		X		0,158
Y36_Y37_Y39_2b	IJssel	Uiterwaardplan	X	X	X		0,093
50006c	IJssel	Groene rivier					0,625
Y49_2b	IJsseldelta	Uiterwaardplan	X		X		0,078
20509d	IJsseldelta	Dijkverlegging					0,141
ZbIJ	IJsseldelta	Zomerbedverdieping					0,242

Maatregelen in de Autonome Ontwikkeling (lopende projecten)

Maatregel	Tak	Type	Nevengeul	Vergraving	Natuurlijk grasland	Dijkverl.	MHW effect [m]
W01_1_L	Boven-Rijn	Uiterwaardplan	X		X		0,023
W03_W04_R01_R02_1_La	Boven-Rijn/PK	Uiterwaardplan		X			0,180
W06_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,063
W10_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,049
W14_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,014
W20_1_L	Waal	Uiterwaardplan	X	X	X		0,080

Maatregel	Tak	Type	Nevengeul	Vergraving	Natuurlijk grasland	Dijkverl.	MHW effect [m]
W21_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,003
W27_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		-0,004
W28_1_L	Waal	Uiterwaardplan	X	X	X		0,016
W48_1_L	Waal	Uiterwaardplan	X	X	X		0,008
R04_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan		X	X		0,025
50010	Neder-Rijn	Obstakelverwijdering					0,081
5000	Neder-Rijn	Obstakelverwijdering					0,180
R16_19_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X	X	X		0,011
R21_R22_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan		X	X		0,006
R27_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X	X	X		-0,006
R29_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X		X		0,000
R42_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X	X	X		-0,014
R51_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan	X	X	X		-0,005
20501+20303	IJssel	Dijkverlegging					0,402
Y40_1_La	IJssel	Uiterwaardplan	X	X	X		0,051
Y41_1_La	IJssel	Uiterwaardplan	X	X	X		0,090
11001	IJsseldelta	Obstakelverwijdering					0,060
Y53_1_L	IJsseldelta	Uiterwaardplan	X	X	X		0,020
Y61_1_L	IJsseldelta	Uiterwaardplan	X		X		0,022

Maatregelen reeds uitgevoerd in de huidige situatie

Maatregel	Tak	Type	Nevengeul	Vergraving	Natuurlijk grasland	Dijkverl.	MHW effect [m]
W29_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,007
W37_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		-0,014
W39_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		0,010
W41_1_L	Waal	Uiterwaardplan		X	X		-0,023
R37_1_L	Neder-Rijn	Uiterwaardplan		X	landbouw		0,005
20401	Neder-Rijn	Dijkverlegging					0,063
50011	Neder-Rijn	Obstakelverwijdering					-0,097
Y08_Y09_Y11_1_L	IJssel	Uiterwaardplan		X	X		0,310
Y60_1	IJsseldelta	Uiterwaardplan		X	X	obstakel	0,009

Uit bovenstaand overzicht blijkt dat een uiterwaardplan in het algemeen bestaat uit de aanleg van een nevengeul en een vergraving. De vergravingen komen meestal voor in de plannen die in het kader van de autonome ontwikkeling en huidige situatie zijn opgenomen. De uiterwaardplannen in het VKA bevatten meestal alleen een nevengeul. Als daar vergraven wordt, is dat heel beperkt. In de gebieden waar vergraven wordt, wordt natuurlijk grasland aangebracht. Slechts in één geval wordt een hoogwatervrij terrein verwijderd en in een ander geval komt een dijkverlegging voor.

B Verslag workshop

B.1 Inleiding

Dit document is het verslag van een workshop die is gehouden als onderdeel van het project ‘Zicht op onzekerheden in de PKB RvdR’ dat door WL wordt uitgevoerd in opdracht van RWS RIZA. Het doel van dit project is om meer inzicht te krijgen in de onzekerheid in de waterstandseffecten van rivierverruimende maatregelen. Op basis van bestaande kennis (literatuur) en expertmeningen (workshop) wordt, aan de hand van een inventarisatie van onzekerheidsbronnen die het hydraulische effect beïnvloeden, een globale inschatting gemaakt van de totaalonzekerheid rond het hydraulische effect van verschillende type maatregelen. In het project wordt vervolgens aandacht besteed aan de wijze waarop middels beheer en beleid met deze onzekerheid rekening kan worden gehouden.

De workshop is bedoeld als aanvulling op de literatuurstudie, om zo goed mogelijk in kaart te brengen welke kennis momenteel aanwezig is over dit onderwerp en wat op basis hiervan geconcludeerd kan worden. Bovendien worden leemten in kennis en verschil en overeenstemming van meningen tussen experts zichtbaar gemaakt. De studie kan zodoende resulteren in aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

Ter voorbereiding op de workshop is een memo rondgestuurd met een eerste inventarisatie van de bronnen van onzekerheid die invloed hebben op de waterstandseffecten van de rivierverruimende maatregelen. Naar aanleiding van deze memo is tijdens de workshop een discussie gevoerd over de volgende vragen:

1. Welke bronnen van onzekerheid spelen allemaal een rol?
2. Hoe groot is de invloed van deze bronnen op de waterstandseffecten van de maatregelen?

B.2 De bronnen van onzekerheid

Met betrekking tot de inventarisatie van de onzekerheidsbronnen is een discussie gevoerd op drie punten:

- Uitgangspunten van de PKB RvdR,
- Modelkalibratie als bron van onzekerheid, en
- Aanvullingen op de inventarisatie van de onzekerheidsbronnen in de voorbereidende memo.

Uitgangspunten PKB RvdR

Een aantal bronnen van onzekerheid, met name de bronnen die zich in de context van het modelgebruik uiten, stelt in feite de uitgangspunten van de PKB RvdR en de wijze waarop MHW's worden berekend, ter discussie. Alhoewel dit zinvol kan zijn vormt het niet het doel van deze studie. Afgesproken wordt dat deze onzekerheden een andere status krijgen in de studie. Er wordt in het vervolg onderscheid gemaakt tussen ‘directe’ en ‘indirecte’ onzekerheden. ‘Directe’ bronnen van onzekerheid zijn onzekerheden die voortkomen uit de modelschematisatie en modelformuleringen én modelinvoer. ‘Indirecte’ onzekerheidsbronnen zijn bronnen die gerelateerd zijn aan de uitgangspunten en aannamen binnen de PKB RvdR. Bij de globale inschatting van de totaalonzekerheid rond het hydraulische effect van verschillende type maatregelen in het project zal alleen de invloed van de ‘directe’ bronnen worden bepaald. De invloed van de ‘indirecte’ bronnen zal op kwalitatieve wijze in een discussiehoofdstuk besproken worden.

Bij 'indirecte' onzekerheden gaat het om de volgende bronnen:

- **Klimaatverandering**
Klimaatveranderingen zijn pas op de lange termijn relevant. De maatregelen in de PKB worden getoetst in de huidige situatie, daarom vervalt deze bron voor deze studie.
- **Zomer- of wintervegetatie in winterbed ('ruwheidsformulering winterbed')**
Een uitgangspunt bij het bepalen van MHW's en daarmee ook in de PKB is dat hoogwater optreedt in de winter. Daarom wordt in de modellen uitgegaan van wintervegetatie in de uiterwaarden. In deze studie richten we ons op de vraag hoe zeker we weten dat met het VKA voldaan wordt aan de in de PKB gestelde eisen. Daarmee vervalt de onzekerheid over de 'seizoenstoestand' van de uiterwaardvegetatie als bron van onzekerheid.
- **Morfodynamiek**
Onderdeel van het eisenpakket waaraan een rivierverruimende maatregel en uiterwaardplan moet voldoen is de voorwaarde dat de morfodynamiek niet ongewenst verandert. Als een plan niet aan deze eis voldoet moet een ander ontwerp gemaakt worden. Om die reden nemen we deze bron van onzekerheid in eerste instantie niet mee in onze analyse. De vraag blijft of het morfologische effect van een ingreep goed voorspeld kan worden en of het mogelijk is de verandering in morfodynamiek tot een minimum te beperken. De morfologische onzekerheden blijven dus zeker van belang voor de waterstandseffecten.
- **Afvoerverdeling over splitsingspunten**
Een andere eis die aan het VKA gesteld wordt, is dat de afvoerverdeling op de splitsingspunten overeen moet komen met de verdeling die wordt nagestreefd in het beleid. In de huidige situatie wijkt de afvoerverdeling al van deze beoogde verdeling af. De PKB moet zorgen voor het herstellen van de 'beleidsmatige' afvoerverdeling. Als uit berekeningen blijkt dat dit niet het geval is, is een nieuw ontwerp vereist. Deze eis geldt overigens nadrukkelijk voor het maatregelenpakket als geheel, niet voor individuele maatregelen. Deze bron van onzekerheid vervalt in eerste instantie voor de huidige studie. Het blijft echter nog de vraag of de afvoerverdeling na uitvoering van de maatregelen goed voorspeld kan worden, en dus of de onzekerheid hierover toeneemt.
Uit een studie van HKV (Duits, 1999) blijkt dat de onzekerheid in de afvoerverdeling niet significant verandert onder invloed van verschillende het maatregelenpakketten. In Duits (1999) is echter de invloed van de veranderingen in de morfodynamica door maatregelen in het invloedsgebied rond splitsingspunten, op de afvoerverdeling buiten beschouwing gelaten. Het resultaat blijkt niet in overeenstemming te zijn met de verwachting van de experts over het belang van deze onzekerheid op het hydraulische effect. Dit is met name het geval indien de maatregelen dichtbij de splitsingspunten worden voorgesteld.

Modelkalibratie als bron van onzekerheid

Het WAQUA model waarmee MHW-berekeningen worden uitgevoerd is gekalibreerd op basis van waterstandsmetingen en gegevens over de afvoerverdeling op de splitsingspunten in het Rijntakkenstelsel. De ruwheid van het zomerbed en de ruwheid van grasland in uiterwaarden zijn daarbij als kalibratieparameters gebruikt. In de kalibratie speelt de weergave van stroomsnelheden en de afvoerverdeling tussen zomerbed en uiterwaarden geen rol.

In eerste instantie was de modelkalibratie opgevoerd als bron van onzekerheid. Er is gediscussieerd over de vraag of dat terecht is. Kalibratie voegt op zichzelf namelijk geen nieuwe onzekerheid toe aan de modelresultaten. Kalibratie is juist gericht op het verkleinen van bestaande onzekerheden. Door het model af te regelen op waarnemingen wordt de onzekerheid met betrekking tot het gebrek aan kennis over de werking van het systeem tijdens de kalibratieomstandigheden gereduceerd. Op die manier ontstaat meer vertrouwen in de modelresultaten tijdens condities die vergelijkbaar zijn met de kalibratieomstandigheden.

Het verband tussen kalibratie en onzekerheden in de modelresultaten kan als volgt worden beschreven. Het startpunt van de kalibratie is de natuurlijke variabiliteit. Het systeem vertoont immers een natuurlijke variabiliteit die niet gevangen wordt door van één set metingen uit te gaan en vervolgens één instelling voor de ruwheden te kiezen. Vervolgens is de onzekerheid in de modelresultaten groter dan deze natuurlijke variabiliteit doordat onze kennis over het systeem beperkt is en we het gekalibreerde model gebruiken voor veel extremere situaties, we extrapoleren namelijk naar MHW. Op welke punten de kennis beperkt is, staat uitgesplitst in de bronnen van onzekerheid die we onder ‘beperkte kennis’ scharen (onder aard van de onzekerheid, in de onzekerheidsmatrix).

Afgesproken is om de modelkalibratie niet als aparte bron van onzekerheid te identificeren. De invloed van kalibratie op de onzekerheid in de waterstandseffecten wordt verwerkt in afzonderlijke bronnen van onzekerheid, die bij de modelschematisatie en -formulering én de modelinvoer terugkomen:

- De kalibratiemethode bepaalt mede in welke mate onzuiverheden of onzekerheden in het model worden gecompenseerd via de ruwheid in het zomerbed. De WAQUA modellen zijn gekalibreerd op gemeten waterstanden op de as van de rivier. Stroomsnelheden en de verdeling van afvoer over het zomer- en winterbed spelen in de kalibratie geen rol. Deze aspecten zijn echter wel belangrijk voor het bepalen van het hydraulisch effect van de maatregelen. De experts benadrukken dat het door de wijze van kalibratie onzeker is of de ruwheden in het zomer- en winterbed zodanig zijn afgeregeld dat die aspecten van de stroming die het waterstandseffect bepalen, juist worden gemodelleerd. Deze onzekerheid uit zich dus in de waardes voor zomer- en winterbedruwheid.
- Gebruikte kalibratiegegevens zijn zelf onzeker door meetfouten. Deze onzekerheid uit zich in het afregelen van de ruwheden in het zomerbed en productiegroenland in het winterbed.
- De keuze voor één beperkte set meetgegevens voor de kalibratie druist in tegen de natuurlijke variabiliteit van het systeem. Deze onzekerheid uit zich in de onzekerheid over de gebruikte waardes voor de zomerbedruwheid, vanwege de natuurlijke variabiliteit hierin die wordt ‘verwaarloosd’ in het model.
- Het gekalibreerde model wordt gebruikt voor waterstandseffecten onder extremere afvoeren dan de gemeten afvoeren. Het is de vraag of het model geschikt is voor deze omstandigheden. Deze onzekerheid uit zich in onzekerheid in:
 - de ruwheid in het zomer- en winterbed,
 - de k-waarden voor de ruwheid in het winterbed,
 - de kalibratiefactor in de ruwheidsformulering voor het zomerbed, en
 - de modellering van de fysische processen onder extreme omstandigheden.
- Het model wordt, uiteraard, niet opnieuw gekalibreerd voor de situatie na uitvoering van de maatregelen. Het is daarmee onzeker in hoeverre de ruwheden in zomer- en winterbed nog voldoende zijn afgeregeld voor de nieuwe situatie. Voor dit model gelden daarom de onzekerheden die hierboven staan beschreven, in sterkere mate.

Ook op een andere manier is de rol van modelkalibratie belangrijk in een onzekerheidsanalyse, namelijk voor onzekerheden over bijvoorbeeld de geometrie van de rivier, of over fouten in de schematisatie. Een voorbeeld: als een kade in een uiterwaard verkeerd is geschematiseerd is deze fout deels gecompenseerd door de modelkalibratie. Om de invloed van deze fout op de waterstandseffecten te berekenen zou het model opnieuw gekalibreerd moeten worden met de verbeterde schematisatie, om vervolgens met dit opnieuw afgeregeld model het effect op de waterstand te berekenen. Kortom, bij dit soort onzekerheden moet de ‘onzekerheidsdempende’ werking van kalibratie meegenomen worden.

Aanvullingen op bronnen van onzekerheid

De volgende aanvullingen zijn gedaan op de inventarisatie van de onzekerheidsbronnen die in de memo ter voorbereiding op de workshop is gemaakt:

- Door de manier van kalibreren is de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed in de modellen onzeker, maar belangrijk voor het berekende waterstandseffect. Deze onzekerheid is een afgeleide van andere bronnen van onzekerheid. Met name de ruwheden in zomer- en winterbed bepalen immers de afvoerverdeling in het model. De onzekerheden in deze factoren bepalen daarmee ook de onzekerheid in de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. Indien de afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed sterk door de maatregelen wordt beïnvloed heeft dit invloed op de onzekerheid in het waterstandseffect.
- Onzekerheid in het ‘menselijk handelen’ bij bijvoorbeeld het inlaatwerk voor de hoogwatergeul bij Veesse Wapenveld wordt herkend als bron van onzekerheid over het waterstandseffect dat uiteindelijk met deze maatregel verkregen wordt. In de PKB wordt geen rekening gehouden met dergelijk ‘falen’. Daarom behandelen we deze onzekerheid apart.
- Een verschil tussen deze onzekerheid rond het inlaatwerk en een onzekerheid als ‘type vegetatie in de uiterwaard’ is dat de eerste niet getoetst kan worden in de eerste jaren dat de maatregel is uitgevoerd. De verwachting is immers dat de hoogwatergeul bijna nooit ingezet zal worden. Voor bijvoorbeeld een uiterwaardplan geldt dat de uiterwaard, zeg, eens per 5 jaar flink overstroomt, zodat er in de eerste jaren waardevolle ervaring wordt opgedaan met het type ruwheid dat er staat en de invloed die dit heeft op de waterstanden.
- In bredere zin bestaat er onzekerheid over het beheer van de maatregelen. Ook hier zijn de uiterwaardplannen met de natuurontwikkeling weer een belangrijk voorbeeld. We gaan ervan uit dat de vegetatie in de betreffende uiterwaarden in elk geval beheerd wordt. De vraag is of de uitvoering van de maatregel (bijvoorbeeld de mate van uiterwaardvergraving) en het uiteindelijke (periodieke) beheer na uitvoering daadwerkelijk volgens het uiterwaardplan-voorstel wordt uitgevoerd of dat de beheerder hiervan afwijkt. Het belang van beheer voor de verschillende type maatregelen is met het oog op de onzekerheid in het waterstandseffect een belangrijk aandachtspunt in deze studie.

B.3 De grootte van de invloed van de onzekerheden

Om te inventariseren welke onzekerheidsbronnen met name belangrijk worden geacht en hoe groot hun invloed op de waterstandseffecten ongeveer is, is aan iedereen gevraagd om per bron en per type maatregel aan te geven in welke van de volgende drie klassen de invloed wordt geschat:

1. kleine invloed, i.e. < 10% van het berekende effect,
2. matige invloed, i.e. 10 – 50% van het berekende effect,
3. grote invloed, i.e. > 50% van het berekende effect.

Bij het inschatten van deze invloed is wel onderscheid gemaakt naar typen maatregelen, maar niet naar riviertak. De workshopdeelnemers hebben middels het plakken van stickers de invloed van elke onzekerheidsbron per type maatregel aangegeven. Het resultaat van deze inventarisatie staat in onderstaande Tabel 1.

De volgende kanttekeningen worden gemaakt bij dit resultaat:

- Achteraf bleek dat niet voor alle bronnen precies duidelijk was wat ermee werd bedoeld, waardoor de interpretaties soms uiteen liepen. Bijvoorbeeld: het belang van de onzekerheidsbron 'ruwheid van de uiterwaarden' komt op twee plaatsen terug in de matrix: bij de modelschematisatie en -formulering en bij de modelinvoer. Het heeft een grote invloed op het resultaat als de betekenis van beide onzekerheidsbronnen door elkaar wordt gehaald.
- Ondanks het van te voren kwantificeren van de klassen is de materie zodanig lastig dat de meeste stickers op persoonlijk gevoel voor klein/groot zijn geplakt. Daarmee geven ze aan hoe de relatieve invloed van de bronnen wordt geschat, maar minder wat de absolute invloed is.
- Soms klopt het gevoel aanwijsbaar niet met wat blijkt uit berekeningen. Emiel heeft hier voorbeelden van, en dat zal ook zeker voor deze resultaten gelden.
- De schattingen van alle deelnemers wegen even zwaar, wat wellicht niet terecht is.

Deze aanpak leidt tot erg globale schattingen over de orde van grootte van de onzekerheden en bevat een hoop ruis, zoals uit bovenstaande opmerkingen blijkt. Daarom zijn de resultaten niet geschikt om harde uitspraken te doen over de onzekerheid in de waterstandseffecten. Wel kan op basis van de resultaten worden geconstateerd waar de experts het over eens zijn, waar ze verschillen van mening, wat naar verwachting de volgorde van 'belangrijkheid' van de bronnen is, wat de leemten in kennis zijn en welke onzekerheidsbronnen duidelijk meer aandacht nodig hebben in een vervolgonderzoek.

Op basis van de discussie en de resultaten van de stickersessie is besloten om de invloed van onzekerheden uit te breiden met één klasse, namelijk de klasse waarbij kan worden uitgegaan dat de onzekerheidsbron een verwaarloosbaar effect heeft. De belangrijkste conclusies uit de tabellen en de discussie zijn:

- Voor de volgende onzekerheidsbronnen is vrijwel unaniem een 'kleine invloed' geschat, welke bovendien met argumenten onderbouwd kan worden. We kunnen uitgaan van een verwaarloosbare bijdrage aan de totale onzekerheid in de waterstandseffecten door onzekerheid in
 - menselijk handelen, met uitzondering van de groene rivier met inlaatwerk,
 - beheer bij kribverlaging, dijkverlegging en verwijderen van knelpunten,
 - laterale instroming, wellicht m.u.v. de groene rivier en zomerbedverdieping in de IJssel,
 - Qh-relaties aan de benedenstroomse randen van het model,
 - riviergeometrie, omdat hierin weinig fouten gemaakt zullen worden, een vrij grote fout nodig is voor een substantiele invloed op de (absolute) waterstanden en fouten in het referentiemodel gedempt worden door de modelkalibratie. We nemen overigens aan dat het verschil tussen het ontwerp van een maatregel en de daadwerkelijke uitvoering geen onzekerheid is die in dit kader een rol speelt. Uitgangspunt voor de PKB zijn immers de huidige ontwerpen,
 - modelimplementatie, i.e. numerieke implementatie en bugs in de software.

- Voor andere bronnen is relatief veel een ‘kleine invloed’ geschat en een paar keer een ‘matige invloed’. Omdat over deze bronnen vooraf en achteraf weinig discussie was interpreteren we deze schattingen als ‘hooguit een effect van een paar procent’:
 - laterale instroom, voor de groene rivier en zomerbedverdieping langs de IJssel,
 - modelresolutie, voor dijkverlegging, groene rivier en zomerbedverdieping,
 - modelschematisatie (i.e. incidentele fouten daarin), voor kribverlaging, dijkverlegging, groene rivier en zomerbedverdieping,
 - vorm afvoergolf (i.e. constante afvoer waarmee gerekend wordt).
- Enkele schattingen vallen op door een vrijwel unanieme ‘grote invloed’. Gezien de kanttekening bij deze schattingen kunnen we hier geen kwantitatieve conclusie aan verbinden. Wel interpreteren we het als potentieel belangrijke bron van onzekerheid en eventueel als ‘waarschuwing’ om hier meer aandacht aan te besteden:
 - ruwheid winterbed (i.e. de gehanteerde k-waarden), voor de uiterwaardplannen,
 - overlaatformulering, voor kribverlaging.
- Een aantal onzekerheidsbronnen valt op door de grote spreiding in de geschatte invloed. Mede op basis van de discussie na het geven van de schattingen concluderen we over deze bronnen dat deze enerzijds niet duidelijk waren gedefinieerd en anderzijds dat de meningen hier echt over verschillen. Met name voor deze bronnen geldt dat er eigenlijk nader onderzoek nodig is om meer inzicht te krijgen in de grootte van de invloed op de waterstandseffecten (bijvoorbeeld met modelberekeningen, schaalmodellen of veldmetingen):
 - ruwheid winterbed, met name wat betreft de ingevulde waarden (i.t.t. tot de formulering),
 - ruwheid zomerbed, als kalibratieparameters,
 - procesbeschrijving.

B.4 Aanpassingen schattingen

Als belangrijkste kanttekening bij de resultaten van de workshop wordt de ‘begripsverwarring’ aangegeven. Tijdens het schatten van de orde van grootte van de invloed van afzonderlijke onzekerheidsbronnen op de waterstandseffecten bestond af en toe onduidelijkheid over de betekenis van de onzekerheidsbronnen. Aan het eind van de workshop is afgesproken dat iedereen op basis van dit verslag én een betere beschrijving van de bronnen, gelegenheid krijgt om nogmaals een schatting te geven voor de orde van grootte van de invloed van de volgende onzekerheidsbronnen op de waterstandseffecten:

- Formulering van ruwheid winterbed
- Ruwheid winterbed als modelinvoer
- Formulering van ruwheid zomerbed
- Procesbeschrijving
- Invloed gridresolutie op modelschematisatie
- Fouten in modelschematisatie

Ter aanscherping van de schattingen die in de workshop zijn gemaakt is voor de bovenstaande onzekerheidsbronnen nogmaals gestickerd. Hiervoor zijn de aangepaste tabellen aan de workshopdeelnemers per e-mail opgestuurd, om met ‘digitaal te stickeren’ opnieuw aan te geven hoe groot de invloed van de onzekerheden op de waterstandseffecten is. De volgende suggesties zijn daarbij gedaan:

- bedenk dat het gaat om de invloed op waterstandseffecten,
- houd dezelfde klassenindeling aan als in de workshop (< 10%, 10-50%, >50%), óf
- geef duidelijk aan welke andere klassenindeling je hanteert.

De nieuwe resultaten staan in Tabel 2. Een vergelijking tussen de Tabellen 1 en 2 wordt voor de ‘directe’ onzekerheidsbronnen in modelschematisatie en formulering en modelinvoer gemaakt in de Tabellen 3 en 4. Het volgende kan worden opgemerkt:

- Tijdens de workshop is door alle experts gestickerd op hetzelfde A0-vel waarop alle onzekerheidsbronnen waren gespecificeerd naar het type maatregel. In tegenstelling tot de workshop wordt nu de mening van de expert niet beïnvloed door het stickergedrag van de andere experts. Hierdoor wordt papagaai-gedrag voorkomen.
- Het valt op dat er veel gematigder is gestickerd. Waar tijdens de workshop de invloed van de onzekerheidsbronnen in de hoogste of de middelste categorie wordt ingedeeld, wordt nu veelal voor de middelste en laagste klasse gestemd. Zo wordt er een veel kleiner gewicht toegekend aan de onzekerheidsbron ‘ruwheid winterbed als modelinvoer’: een verschuiving van groot naar matig voor uiterwaardplannen en van matig naar klein voor kribverlaging, verwijdering knelpunt en zomerbedverdieping. De invloed van de onzekerheidsbronnen ‘procesbeschrijving’ verschuift van matig naar klein voor de grootschalige dijkverlegging en verwijdering van knelpunten. Eenzelfde beeld zien we voor de invloed van ‘formulering ruwheid zomerbed’ bij grootschalige dijkverlegging en de groene rivier.
- De enige onzekerheidsbron waarvoor de invloed hoger wordt ingeschaald is de fout in modelschematisatie. Hier zien we een verschuiving van klein naar matig.

Tabel B-1: Letterlijke weergave van de schattingen die in de workshop gedaan zijn voor de grootte van de invloed van de onzekerheidsbronnen op de waterstandseffecten. K = kleine invloed (< 10%), M = matige invloed (10 – 50%), G = grote invloed (> 50%).

	Onzekerheden in context												Onzekerheden in modelinvoer														
	morfo-dynamiek			Qverdeling spl. punten			menselijk handelen			beheer			laterale instroom			Qh-relatie			rivier-geometrie			ruwheid winterbed			ruwheid zomerbed		
	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G
uiterwaardplan	2	4	1	2	4		6	1			7	2	8			9			7		2	2		7	3	1	3
kribverlaging	3	3	1	2	4		7			7	1		8			9			7		2	3		4	2	1	3
dijkverlegging	4			2	4		7			7			9			9			7		2	2	1	6	4	1	1
verw. knelpunt	3	2	1		4		8			7			8			8			7		2	4	1	3	4	1	2
groene rivier	3	4	1	4	2		3	1	5		5	5	6	2		8			7		2	2	4	2	4	1	1
verdieping zomerbed	3	1	2	4	2		7			3	3	1	7	1		8			7		2	4	1	3	2	2	2

	Onzekerheden in model																							
	proces-beschrijving			ruwheid zomerbed			ruwheid winterbed			overlaat-formulering			modelresolutie			model-schematisatie			vorm afvoergolf			model implementatie		
	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G
uiterwaardplan	3	3	2	3	4		1	5	2	1	5	1	3	5		4	5	1	4	2		6		
kribverlaging	3	4	1	3	4	1	5	2		1		7	4	3	2	7	2		5	1		6		
dijkverlegging	3	3	1	1	2		1	4	2	1			6	1		7	2		5	1		6		
verw. knelpunt	4	3	1	4	3		3	4		1	4	2	4	4	1	5	5		6	1		6		
groene rivier	4	3	1	2	4		3	3		5	1	1	6	1		7	2		4	3		6		
verdieping zomerbed	4	3	1	4	3		5	2		5		1	8	1		7	2		5	1		6		

Tabel B-2: Nieuwe inschatting van de invloed van onzekerheidsbronnen. Alleen voor de niet gearceerde kolommen is gevraagd om de mening ten aanzien van de invloed van de onzekerheidsbronnen op de waterstandseffecten te herzien. K = kleine invloed (< 10%), M = matige invloed (10 – 50%), G = grote invloed (> 50%).

	Onzekerheden in context												Onzekerheden in modelinvoer																	
	morfo-dynamiek			Qverdeling spl. punten			menselijk handelen			beheer			laterale instroom			Qh-relatie			rivier-geometrie			ruwheid winterbed als invoer			ruwheid zomerbed					
	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G			
uiterwaardplan	5		1	3	3						5	2													1	5				
kribverlaging	4	2		4	2																				6					
dijkverlegging	6			3	3																				3	2	1			
verw. knelpunt	5	1		4	2																				4	2				
groene rivier	4	2		5	1		1	1	3	1	4	1													2	3	1			
verdieping zomerbed	4	2		5	1					1	4	1													6					

	Onzekerheden in model																							
	proces-beschrijving			formulering ruwheid zomerbed			formulering ruwheid winterbed			overlaat-formulering			invloed gridresolutie op schematisatie			fouten in modelschematisatie			vorm afvoergolf			model implementatie		
	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G	K	M	G
uiterwaardplan	2	4		3	3			5	1				1	5		2	3	1						
kribverlaging	1	5		3	2	1	6						2	3	2	5	1							
dijkverlegging	5	1		5	1		4	2	1				4	2		5	1							
verw. knelpunt	5	1		3	3		5		1				1	5		2	3	1						
groene rivier	4	2		5	1		2	4	1				4	2		6								
verdieping zomerbed	4	2		1	4	1	4	2					6			6								

Tabel B-3: Overzicht van geschatte invloed van elke onzekerheid over de modelinvoer op de *effecten* van elk van de maatregelen (geen = verwaarloosbaar effect, klein = bandbreedte < 10% van berekende effect, matig = 10-50% van berekende effect, groot = bandbreedte > 50% van berekende effect). Linker zijde van elke kolom geeft de eerste schatting weer, de rechter zijde de tweede herziene schatting.

Maatregel	Verandering onzekerheid in modelinvoer		Verandering onzekerheid in model (schematisatie, formulering etc.)										
	Winterbed-ruwheid als modeinvoer		Procesbeschrijving		Formulering zomerbedruwheid		Formulering winterbedruwheid		Gridresolutie		fouten in modelschematisatie		
	<i>workshop origineel</i>	<i>workshop origineel</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	<i>workshop herzien</i>	
uiterwaardplan zonder afgraving	groot	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	klein	matig
uiterwaardplan met afgraving	groot	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	matig	klein	matig
kribverlaging	matig	klein	matig	matig	matig	matig	klein	klein	matig	matig	matig	klein	klein
grootschalige dijkverlegging	matig	matig	matig	klein	matig	klein	matig	matig	klein	klein	matig	klein	klein
verwijdering knelpunt	matig	klein	matig	klein	matig	matig	matig	klein	matig	matig	matig	klein	matig
groene rivier	matig	matig	matig	matig	matig	klein	matig	matig	klein	klein	matig	klein	klein
verdieping zomerbed	matig	klein	matig	matig	matig	matig	klein	klein	klein	klein	matig	klein	klein

C Onzekerheidsmatrix

Tabel C-1 Onzekerheidsmatrix met een overzicht van verschillende bronnen van de onzekerheid in ontwerpwaterstanden gerangschikt naar drie dimensies plaats, graad en aard. De nummering komt overeen met de nummering in de paragrafen 3.3.1 – 3.3.4. De **vetgedrukte** onzekerheidsbronnen hebben naar verwachting een matige tot grote invloed op de waterstandseffecten (Hoofdstuk 3).

Plaats onzekerheid in het proces		Onzekerheidsgraad			Onzekerheidsaard	
		Kwantificeerbaar in kansen	Erkende onwetendheid		Beperkte kennis	Variabiliteit
Context		4. seizoensvariatie vegetatie winterbed	2. morfodynamiek 3. afvoerverdeling op splitsingspunten 6. beheer	1. klimaatsveranderingen 5. menselijk handelen		1. klimaatsveranderingen 2. morfodynamiek 3. afvoerverdeling op splitsingspunten 4. seizoensvariatie vegetatie winterbed 5. menselijk handelen 6. beheer
Model	Structuur	5. gridresolutie 7. vorm afvoergolf	2. ruwheidsformulering zomerbed 3. ruwheidsformulering winterbed	1. procesbeschrijving 4. overlaatformulering 6. fouten in schematisatie	4. overlaatformulering 5. gridresolutie 6. fouten in schematisatie	1. procesbeschrijving 2. ruwheidsformulering zomerbed 3. ruwheidsformulering winterbed 7. vorm afvoergolf
	Technisch	1. numerieke implementatie		2. bugs in software	1. numerieke implementatie 2. bugs in software	
Invoer	Randvoorwaarden	1. laterale instroming 2. Q-h relatie				1. laterale instroming 2. Q-h relatie
	Systeem data		1. riviergeometrie 2. winterbedruwheid (k-waardes)		1. riviergeometrie	2. winterbedruwheid (k-waardes)