

DI: 324103

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, Directie C

# Invloed basisalternatieven Ruimte voor de Rivier op de bevaarbaarheid van en onderhoudsbaggerwerk op de rivier

Een stochastische benadering



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Directie Oost-Nederland

Bibliotheek

Nr.

SV RVR103 ON

november 2004

 TU Delft

 **HKV** LIJN IN WATER



Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Directie Oost-Nederland

Postbus 9070  
6800 ED Arnhem  
Tel. 026 - 3688355

## Bibliotheek

naam	afd.	retour	paraaf

S.V.P. TIJDIG VERLENGEN

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland

# **Invloed basisalternatieven Ruimte voor de Rivier op de bevaarbaarheid van en onderhoudsbaggerwerk op de rivier**

## **Een stochastische benadering**

Auteurs:       ir. S. van Vuren  
                  ir. H.J. Barneveld

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding tot het project .....	1
1.2	Doel van het onderzoek .....	1
1.3	Uitgangspunten en randvoorwaarden .....	2
1.4	Leeswijzer .....	3
<b>2</b>	<b>Methode voor statistische analyse van bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk .....</b>	<b>4</b>
2.1	Inleiding .....	4
2.2	SOBEK Rijntakkenmodel .....	4
2.2.1	Algemeen .....	4
2.2.2	SOBEK-modellen basialternatieven .....	5
2.3	Onzekerheid en Monte Carlo simulatie .....	6
2.3.1	Onzekerheid .....	6
2.3.2	Monte Carlo simulatie en Bootstrap resampling techniek .....	7
2.3.3	Rekentijdreductie en aanpassingen SOBEK Rijntakkenmodel .....	8
2.4	Scheepvaart Rijntakken en methode ter bepaling van de bevaarbaarheid .....	8
2.4.1	Scheepvaartklasse en scheepvaarteisen .....	8
2.4.2	Methode ter bepaling van de bevaarbaarheid .....	9
2.5	Methode ter bepaling van het onderhoudsbaggerwerk .....	16
2.5.1	Baggerstrategie en volumebepaling .....	16
2.5.2	Terugstortstrategie .....	17
2.5.3	Samenvatting reken- en analyseproces .....	18
<b>3</b>	<b>Hydraulische en morfologische effecten Ruimte voor de Rivier basialternatieven .....</b>	<b>20</b>
3.1	Inleiding .....	20
3.2	Hydraulische effecten .....	20
3.3	Morfologische effecten .....	22
3.3.1	Uitgangssituatie .....	22
3.3.2	Ruimtelijk basialternatief .....	28
3.3.3	Budget basialternatief .....	29
3.4	Conclusies .....	32
<b>4</b>	<b>Bevaarbaarheid Rijntakken zonder onderhoudsbaggerwerk .....</b>	<b>33</b>
4.1	Inleiding .....	33
4.2	Uitgangssituatie .....	33
4.3	RvdR-basialternatieven .....	43
4.3.1	Ruimtelijk basialternatief .....	43
4.3.2	Budget basialternatief .....	44
4.4	Conclusies .....	49
<b>5</b>	<b>Onderhoudsbaggerwerk Rijntakken .....</b>	<b>51</b>
5.1	Inleiding .....	51
5.2	Uitgangssituatie .....	52
5.2.1	Onderhoudsbaggerwerk .....	52
5.2.2	Effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid .....	57
5.3	RvdR-basialternatieven .....	63
5.3.1	Onderhoudsbaggerwerk .....	63
5.3.2	Effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid .....	70
5.4	Conclusies .....	73



<b>6</b>	<b>Overeenstemming van berekeningen met meetgegevens .....</b>	<b>76</b>
6.1	Inleiding .....	76
6.2	Morfologische berekeningen en bodempeilingen .....	76
6.2.1	Jaarlijkse bodempeilingen, structurele en incidentele ingrepen in de rivier .....	77
6.2.2	Data-analyse op 'homogene' subdatasets .....	84
6.3	Bevaarbaarheidsanalyse en Minst gepeilde Dieptes .....	94
6.4	Berekend en geregistreerd onderhoudsbaggerwerk .....	99
6.4.1	Geregistreerd onderhoudsbaggerwerk .....	99
6.4.2	Overeenkomsten geregistreerd en berekend onderhoudsbaggerwerk .....	99
6.4.3	Conclusies .....	104
6.5	Conclusies .....	104
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>105</b>
7.1	Conclusies .....	105
7.2	Aanbevelingen .....	107
<b>8</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>109</b>

Bijlage 1:	Rivierverruimende maatregelen per inrichtingsalternatief
Bijlage 2:	Verandering afvoerverdeling op Rijntakken
Bijlage 3:	Memo aanpassingen Sobek Rijntakkenmodel ten behoeve van rekestijdreductie
Bijlage 4:	Statistische karakteristieken morfologische veranderingen als gevolg van RvdR-basisalternatieven
Bijlage 5:	Bevaarbaarheid per rivierlocatie
Bijlage 6:	Effect RvdR-alternatieven op bevaarbaarheid
Bijlage 7:	Onderhoudsbaggerwerk
Bijlage 8:	Effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid
Bijlage 9:	Overeenstemming stochastische resultaten met meetgegevens
Bijlage 10:	Trajectindeling Rijntakken



## Samenvatting

Door klimaatverandering zullen de hoogwaterafvoeren in de toekomst naar verwachting toenemen. Om de veiligheid in het rivierengebied ook in de toekomst te kunnen garanderen, zoekt de overheid in het project Ruimte voor de Rivier (RvdR) naar maatregelen om de afvoercapaciteit van rivieren te vergroten en dijkverhoging zoveel mogelijk te vermijden. In de PKB (Planologische Kern-Beslissing) studie RvdR is een aantal basisalternatieven voor de Nederlandse Rijntakken onderzocht, waarmee de verhoging van de maatgevende afvoer van 15.000 naar 16.000 m<sup>3</sup>/s veilig kan worden opgevangen. Op basis van deze studie heeft de Stuurgroep RvdR twee basisalternatieven geselecteerd die in een Milieueffectrapport (MER) op hun effecten worden beoordeeld. Het betreft het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief. Het budgetalternatief bestaat uit een mix van (een groot aantal) technische maatregelen, waaronder ook dijkversterking en ruimtelijke maatregelen. Dit alternatief blijft - zo is de huidige inschatting - binnen het budget van 1,9 miljard euro. Het ruimtelijke alternatief is ook een mix van ruimtelijke en technische maatregelen. Het accent ligt echter op ruimtelijke oplossingen, zoals het stroomlijnen of verwijderen van hoogwatervrije terreinen, het graven van oever- en nevengeulen, het verlagen van zomerkaden en het afgraven van uiterwaarden in combinatie met natuurontwikkeling.

Naast de gewenste waterstandsaling hebben de basisalternatieven ook andere rivierkundige effecten, zoals morfologische. In een studie van RIZA (RIZA, 2004) zijn de effecten van de inrichtingsmaatregelen op de bodemontwikkeling en de bevaarbaarheid bepaald. Daarbij is uitgegaan van een toekomstig afvoerverloop, overeenkomend met dat van een reeds opgetreden periode. De resultaten op basis van een 1-dimensionaal rekenmodel van de Rijntakken beschrijven uiteraard slechts één van de mogelijkheden voor de toekomstige ontwikkeling van afvoeren, waterstanden en rivierbodem. Doel van voorliggende studie is om meerdere toekomstige afvoerreeksen te beschouwen, om:

1. de verwachtingswaarde van de effecten van de basisalternatieven in termen van bodemontwikkeling, bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk te bepalen;
2. de bandbreedte van bovenstaande effecten in beeld te brengen, om zodoende iets te zeggen over de onzekerheden van toekomstige ontwikkelingen en de veranderingen daarin als gevolg van de basisalternatieven;
3. te kijken of op basis van vele mogelijke afvoerreeksen de conclusies ten aanzien van de rivierkundige effecten van de basisalternatieven anders zijn dan in RIZA (2004).

De resultaten zijn van belang voor beoordeling van de basisalternatieven.

In dit rapport zijn de resultaten met betrekking tot de punten 1 en 2 beschreven.

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van een 1-dimensionaal SOBEK-model voor de Rijntakken Bovenrijn, Waal, Pannerdens Kanaal en IJssel. De Nederrijn en Lek zijn in verband met de rekentijd niet beschouwd. Om een goed beeld te krijgen van de mogelijke morfologische veranderingen met en zonder rivierverruimingsmaatregelen, zijn voor 3 situaties (huidige situatie en 2 basisalternatieven) 400 mogelijke toekomstige afvoerreeksen van 15 jaar gegenereerd en doorgerekend (Monte Carlo Simulaties of MCS). Een statistische analyse van de 400 modeluitkomsten geeft per situatie inzicht in de verwachtingswaarde en onzekerheden van morfologische ontwikkelingen, bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk. Voor de bevaarbaarheid en bepaling van het benodigde onderhoudsbaggerwerk is uitgegaan van beoogde vaarbaaneisen voor Bovenrijn, Waal en IJssel en zijn de waterdieptes uit het 1-dimensionale SOBEK-model gecorrigeerd voor de bodemdwarshelling in rivierbochten. Om de voortgaande bodemdaling te reduceren, wordt conform de huidige baggerstrategie van Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland, het gebaggerde sediment bovenstrooms weer teruggestort.

Om enig idee te krijgen van de toepasbaarheid van de gevolgde methodiek zijn de resultaten voor de huidige situatie geconfronteerd met metingen van bodemontwikkeling, bevaarbaarheid (Minst Gepeilde Dieptes) en onderhoudsbaggerwerk (zie hoofdstuk 6). Daaruit blijkt dat de berekende waarden voor wat betreft gemiddelde en betrouwbaarheidsband in grote lijnen



goed vergelijkbaar zijn met de metingen. Dit geeft vertrouwen in de gebruikte modellering en de aanpak.

De analyses van bodemontwikkeling, bevaarbaarheid en baggerstrategie voor de 3 beschouwde situaties leiden tot de volgende conclusies:

### **Bodemontwikkeling (hoofdstuk 3)**

1. De morfologische ontwikkeling bij uitvoering van het budgetalternatief is voor zowel Waal als IJssel vrijwel identiek aan die zonder maatregelen. Dit geldt zowel voor de verwachte bodemverandering als voor de betrouwbaarheidsband ervan. Slechts op de Boven-IJssel wordt de betrouwbaarheidsband ter plaatse van de rivierverruiming bij Olburgse waard en Spaensweerd (km 904-915) groter;
2. Het ruimtelijk alternatief bevat met name op de Waal verruimingsmaatregelen. Ter plaatse van dergelijke maatregelen komt de bodem belangrijk hoger te liggen dan zonder maatregelen of het budgetalternatief. Tevens wordt de betrouwbaarheidsband in het ruimtelijk alternatief lokaal groter dan in beide andere situaties.

### **Bevaarbaarheid (hoofdstuk 4)**

1. Reeds in de huidige situatie voldoen de Waal en IJssel niet aan de eis, dat bij afvoeren groter dan de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA<sup>1</sup>), voldoende vaarbaanbreedte en -diepte aanwezig zijn.
2. Het budgetalternatief heeft nauwelijks effect op de bevaarbaarheid in Bovenrijn en Waal. Op de IJssel wordt de bevaarbaarheid beter op het traject waarop de zomerbedbodem wordt verlaagd (km 975-1001). Direct bovenstrooms van dat traject wordt de bevaarbaarheid minder.
3. Het ruimtelijk alternatief leidt op de Waal, op de trajecten waarop flink wordt verruimd, tot een afname van de bevaarbaarheid. Op de IJssel lijkt het ruimtelijk alternatief erg op het budgetalternatief en zijn de effecten derhalve vergelijkbaar.

### **Onderhoudsbaggerwerk (hoofdstuk 5)**

Om de bevaarbaarheid voor de 3 situaties te verbeteren zijn de berekeningen herhaald, waarin periodiek de bevaarbaarheid is getoetst en indien noodzakelijk baggerwerk is uitgevoerd. Het gebaggerde sediment is vervolgens in het traject 1,5-5 km bovenstrooms van de baggerlocatie teruggestort<sup>2</sup>. Voor de 3 situaties zijn het baggervolume, de transportafstand en het effect op de bevaarbaarheid bepaald en geanalyseerd.

1. Hoewel in alle situaties het baggerwerk gemiddeld gezien wel tot verbetering van de bevaarbaarheid leidt, wordt de beoogde bevaarbaarheid (geen beperkingen bij afvoeren groter dan OLA) niet gehaald. Op de IJssel wordt door baggerwerk de vaarbaan nog lang niet gehaald, met uitzondering van het traject waarop de bodem in de beide basialternatieven wordt verdiept. Op de Bovenrijn en Waal voldoet de vaarbaan door baggerwerk bijna aan de eisen, met uitzondering van het bochtige Waaltraject tussen Pannerdense Kop en Nijmegen. De gehanteerde terugstortstrategie blijkt voor dit traject zelfs averechts te werken en behoeft nadere optimalisatie. Verder leiden de beperkingen van de 1-dimensionale schematisatie om bagger- en terugstortwerk te simuleren tot een overschatting van het baggerwerk in de berekeningen en onderschatting van de bevaarbaarheid.
2. Het gemiddelde jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk neemt in het ruimtelijk alternatief met 11% toe ten opzichte van de uitgangssituatie. De betrouwbaarheidsband van dit alternatief is iets (ca 3%) groter dan in de uitgangssituatie.
3. Voor het budgetalternatief geldt dat het gemiddeld jaarlijkse baggerwerk 12% afneemt ten opzichte van de uitgangssituatie. De betrouwbaarheidsband is voor het budgetalternatief 13% kleiner dan in de uitgangssituatie.
4. De verschillen tussen de 3 situaties in de transportafstand per gebaggerde volume-eenheid zijn klein.

<sup>1</sup> afvoer die gemiddeld 5% van de tijd wordt onderschreden

<sup>2</sup> of verder bovenstrooms als in het beoogde terugstorttraject te weinig ruimte aanwezig is



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding tot het project

In het project Ruimte voor de Rivier (RvdR) zoekt de overheid vanwege verwachte hogere rivierafvoeren naar maatregelen om de afvoercapaciteit van rivieren te vergroten en dijkverhoging zoveel mogelijk te vermijden. Onder deze maatregelen vallen onder andere de verlaging van uiterwaarden en kribben, het verwijderen van hydraulische obstakels en het aanleggen van nevengeulen.

Deze rivierverruimende maatregelen hebben een plaatselijk waterstandverlagend effect. Dit effect werkt kilometers in bovenstroomse richting door (stuwkromme-effect). Naast dit hydraulische effect leiden de maatregelen ook tot een morfologische reactie van de rivier in de vorm van sedimentatie en erosie in het zomerbed. Deze reactie is te voorspellen met morfologische modellen. De rivierverruimende maatregelen kunnen leiden tot een versterkte bodemvariatie in de Nederlandse Rijntakken (zie (Van Vuren & Van Breen, 2003) en (Van Breen et al, 2003)). Deze morfologische reacties kunnen tot grote hinder leiden voor de scheepvaart en tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk in de rivier. Bovendien kunnen zij de gewenste effecten van de rivierverruiming weer gedeeltelijk teniet doen.

In de PKB (Planologische Kern-Beslissing) studie RvdR is een aantal basialternatieven voor de Nederlandse Rijntakken onderzocht. Op basis van deze studie heeft de Stuurgroep RvdR twee basialternatieven geselecteerd die in een Milieueffectrapport (MER) op hun effecten worden beoordeeld. Het betreft het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief. Het budgetalternatief bestaat uit een mix van (een groot aantal) technische maatregelen, waaronder ook dijkversterking en ruimtelijke maatregelen. Dit alternatief blijft - zo is de huidige inschatting - binnen het budget van 1,9 miljard euro. Het ruimtelijke alternatief is ook een mix van ruimtelijke en technische maatregelen. Het accent ligt echter op ruimtelijke oplossingen, zoals het stroomlijnen of verwijderen van hoogwatervrije terreinen, het graven van oever- en nevengeulen, het verlagen van zomerkaden en het afgraven van uiterwaarden en ontwikkelen tot natuur. De rivierverruimende maatregelen die in deze alternatieven worden voorgesteld staan beschreven in Bijlage 1.

Rijkswaterstaat RIZA voert in opdracht van Directie Oost Nederland het rivierkundige deel van de MER uit om onder andere, de morfologische effecten van genoemde alternatieven te onderzoeken. Een vraag die in deze MER bijvoorbeeld moet worden beantwoord is hoe de alternatieven de bevaarbaarheid van de rivier beïnvloeden en in hoeverre de alternatieven tot meer onderhoudsbaggerwerk zullen leiden. In aanvulling op dit onderzoek van RIZA is in voorliggend rapport een methode uitgewerkt waarmee de bevaarbaarheid van de rivier en het onderhoudsbaggerwerk voor de uitgangssituatie (huidige situatie), het ruimtelijke alternatief en het budgetalternatief in statistische zin is gekwantificeerd. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is, dat rekening wordt gehouden met het effect van een onzeker toekomstig afvoerloop op morfologie, bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk. Het onderzoek is uitgevoerd door HKV LJN IN WATER en de TU-Delft.

## 1.2 Doel van het onderzoek

Het eerste doel van dit onderzoek is te bepalen in hoeverre de geselecteerde basialternatieven voor de Nederlandse Rijntakken de bevaarbaarheid van de rivier beïnvloeden en tot meer (of minder) onderhoudsbaggerwerk zullen leiden als gevolg van de veranderde morfologische activiteit van de bodem in de hoofdgeul.

Het voorspellen van de bevaarbaarheid van de rivier en het onderhoudsbaggerwerk voor de uitgangssituatie en de basialternatieven wordt beïnvloed door de onzekerheden in bodemontwikkeling en waterstanden die inherent zijn aan de rivier als natuurlijk systeem. Ook



onzekerheidsbronnen, aannames en uitgangspunten ten aanzien van onder andere de baggerstrategieën, de eisen aan de rivier als vaarweg, het model waarmee de effecten worden geanalyseerd en het ontwerp van de basisalternatieven kunnen een grote invloed hebben op de voorspellingen. De bevaarbaarheid en het onderhoudsbaggerwerk voor de uitgangssituatie en de basisalternatieven voor de Nederlandse Rijntakken worden daarom in statistische zin gekwantificeerd.

Een tweede doelstelling is derhalve dat de onzekerheden in de bevaarbaarheid en het baggerwerk als gevolg van bepaalde onzekerheidsbronnen expliciet worden gemaakt. Deze uitgangspunten en onzekerheidsbronnen worden in de volgende Paragraaf gespecificeerd.

### 1.3 Uitgangspunten en randvoorwaarden

De volgende uitgangspunten en randvoorwaarden zijn in het onderzoek gehanteerd:

- **Baggerstrategie** - Er is uitgegaan van een correctieve baggerstrategie. Dat wil zeggen dat indien er niet aan de vaarbaaneisen wordt voldaan er correctief baggeronderhoudswerk wordt uitgevoerd. Conform het Nederlands baggerbeleid voor de Bovenrivieren is uitgangspunt van dit onderzoek dat het volume sediment dat aan de rivier wordt onttrokken door baggerwerk ook weer in de rivier wordt teruggestort.
- **Vaarbaaneisen** - Voor de Nederlandse Rijntakken geldt, dat de rivier als vaarweg bij een afvoer groter dan de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) te allen tijde moet voldoen aan de vereiste vaarbaandimensies. Er worden eisen gesteld ten aanzien van de vaarbaanbreedte en de vaarbaandiepte.
- **Model waarmee de effecten worden bepaald** - De morfologische en hydraulische voorspellingen voor de uitgangssituatie en twee basisalternatieven zijn met behulp van het 1-D SOBEK Rijntakkenmodel geanalyseerd. Deze voorspellingen zijn gebruikt om de bevaarbaarheid van en de vereiste baggervolumes in de rivier als functie van ruimte en tijd te bepalen. Het PKB SOBEK Rijntakkenmodel dat gebaseerd is op Versie 2000.3 van het SOBEK Rijntakkenmodel is gebruikt (Kroekenstoel, 2004). RIZA heeft de modelschematisaties voor de twee basisalternatieven ter beschikking gesteld.
- **Onzekerheden in modelvoorspellingen** - Monte Carlo Analyse is toegepast om de invloed van de onzekerheid in het afvoerverloop (zie Hoofdstuk 2) op de bevaarbaarheid en het baggerwerk te kwantificeren. Gebleken is (Van der Klis, 2000 en Van Vuren et al. 2002) dat de onzekerheid in het afvoerverloop een relatief grote invloed heeft op de onzekerheid in morfologische voorspellingen.
- **Rijntakken die zijn beschouwd in het onderzoek** - Van de Nederlandse Rijntakken is de bevaarbaarheid van en het onderhoudsbaggerwerk in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel onderzocht. Hiertoe zijn deze riviertakken onderverdeeld in deeltrajecten, zie Tabel 1-1.

Riviertrajecten	Kmr.	Trajectbeschrijving
Traject Waal 1	858-867	Boven Rijn van Spijk - Pannerdense Kop
Traject Waal 2	867-887	Pannerdense Kop - Veur Lent Nijmegen
Traject Waal 3	887-913	Veur Lent Nijmegen – Tiel
Traject Waal 4	913-953	Tiel - Dalem/Woudrichem
Traject IJssel 1	878-905	IJsselkop – Dieren
Traject IJssel 2	905-950	Dieren – Terwolde
Traject IJssel 3	950-971	Terwolde – Wapenveld
Traject IJssel 4	971-1001	IJsseldelta

Tabel 1-1: trajectindeling Rijntakken, Bovenrijn, Waal en IJssel.

De bevaarbaarheid van en het onderhoudsbaggerwerk in het Pannerdens Kanaal, de Nederrijn en de Lek is niet geanalyseerd. Het Pannerdens Kanaal wordt niet geanalyseerd aangezien er geen scheepvaartknelpunten aanwezig zijn op deze riviertak. In de Nederrijn en de Lek zijn stuwregelaars opgenomen. Deze zijn rekenintensief, onder meer omdat de regelingen beperkingen stellen aan de te hanteren tijdstap. Dit maakt de toepassing van



Monte Carlo simulaties zeer rekenintensief. Om die reden is besloten deze takken uit het model te verwijderen (zie Paragraaf 2.3.3).

- *Periode waarover de bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk is geanalyseerd* - De bevaarbaarheid van en het onderhoudsbaggerwerk in de Bovenrijn, Waal en IJssel is over een periode van 10 jaar onderzocht, te weten in de periode tussen 5 en 15 jaar na begin van de simulatieperiode. In de eerste 5 jaar is wel correctief onderhoudsbaggerwerk toegepast, maar zijn de bevaarbaarheid en het baggeronderhoudswerk nog niet geanalyseerd. Deze eerste 5 jaar wordt beschouwd als een inspeelperiode.
- *Ontwerp basisalternatieven* - Aangenomen is dat de modellen van de uitgangssituatie en de basisalternatieven de afvoerdeling en de sedimentverdeling op de splitsingspunten juist weergeven.
- *Randvoorwaarden ten aanzien van de toekomstige situatie* - het effect van de mogelijke toekomstige klimaatsverandering op de bevaarbaarheid en het onderhoudsbaggerwerk valt buiten de scope van dit onderzoek.

## 1.4 Leeswijzer

In voorliggend rapport worden de aanpak en resultaten van het onderzoek gepresenteerd. In Hoofdstuk 2 wordt een toelichting gegeven op het gebruikte SOBEM Rijntakkenmodel, de methodiek om het onzekere toekomstige afvoerloop mee te nemen voor bepaling van verwachtingswaarde en onzekerheidsband van de morfologische voorspellingen, de scheepvaartseisen en hoe deze kunnen worden getoetst op basis van 1-dimensionale rekenresultaten, alsmede de wijze waarop de onderhoudsbaggervolumes in het rekenmodel worden bepaald.

Op basis van de in hoofdstuk 2 geschetste methodiek worden in hoofdstuk 3 de waterstandseffecten van de in de studie beschouwde twee basisalternatieven toegelicht en worden de morfologische ontwikkelingen van uitgangssituatie en de twee alternatieven bepaald en onderling vergeleken.

In hoofdstuk 4 wordt op basis van de in hoofdstuk 3 bepaalde morfologische ontwikkelingen in een periode van 10 jaar, gekeken naar de bevaarbaarheid op (trajecten van<sup>3</sup>) de Bovenrijn, Waal en IJssel voor verschillende vaardieptes. Daarbij is er conform de berekeningen uit hoofdstuk 3 vanuit gegaan, dat er geen onderhoudsbaggerwerk ten behoeve van de scheepvaart wordt uitgevoerd.

In hoofdstuk 5 wordt vervolgens berekend hoeveel onderhoudsbaggerwerk op Bovenrijn, Waal en IJssel nodig is om de bevaarbaarheid te verbeteren en waar dat gebaggerde sediment moet worden teruggestort. Tevens is in dit hoofdstuk gekeken of en in welke mate de bevaarbaarheid door het baggerwerk toeneemt.

In hoofdstuk 6 tenslotte wordt een vergelijkingsanalyse uitgevoerd op basis van berekende en gemeten parameters. Doel is om een idee te krijgen van de toepasbaarheid van het gebruikte rekenmodel en rekenmethodiek. Bij de vergelijking zijn berekende en gemeten waarden voor bodemligging, bevaarbaarheid (Minst Gepeilde Dieptes) en onderhoudsbaggerwerk beschouwd.

Het rapport wordt in hoofdstuk 7 afgesloten met de conclusies en aanbevelingen.

<sup>3</sup> De beschouwde trajecten op Bovenrijn, Waal en IJssel zijn geïllustreerd in Bijlage 10.



## 2 Methode voor statistische analyse van bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk

### 2.1 Inleiding

Een 1-D SOBEK model (WL, 2001), het SOBEK Rijntakkenmodel<sup>4</sup> (Jesse & Kroekenstoel, 2001), wordt gebruikt om de hydraulische en morfologische ontwikkelingen voor de uitgangssituatie en de basisalternatieven te analyseren. De voorspellingen van deze ontwikkelingen worden vervolgens vertaald naar de bevaarbaarheid van en vereiste baggervolumes in de rivier als functie van ruimte en tijd. Om het effect van onzekerheid in het afvoerverloop op de bevaarbaarheid van de rivier en het benodigde onderhoudsbaggerwerk te onderzoeken, worden Monte Carlo simulaties (MCS) met het Rijntakkenmodel uitgevoerd (zie Paragraaf 2.3.2).

Voorafgaand aan de beschrijving van de methode om de bevaarbaarheid en het onderhoudsbaggerwerk te bepalen, wordt ingegaan op het SOBEK Rijntakkenmodel (Paragraaf 2.2), de onzekerheden en de Monte Carlo simulatie (Paragraaf 2.3). In Paragraaf 2.4 worden de methoden om de bevaarbaarheid en het onderhoudsbaggerwerk te kwantificeren beschreven.

### 2.2 SOBEK Rijntakkenmodel

#### 2.2.1 Algemeen

De hydraulische en morfologische ontwikkelingen in geval van de uitgangssituatie en de basisalternatieven worden geanalyseerd met het 1-D SOBEK modelinstrumentarium (WL, 2001), en meer specifiek, het SOBEK Rijntakkenmodel (Jesse & Kroekenstoel, 2001 en Kroekenstoel, 2004). In het Rijntakkenmodel worden zes Rijntakken onderscheiden: de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdens Kanaal, de IJssel, de Nederrijn en de Lek. Twee splitsingspunten, de Pannerdense Kop en de IJsselkop, verbinden deze Rijntakken (zie Figuur 2-1 en Bijlage 10). Het model maakt gebruik van de dwarsdoorsnede gemiddelde ondiepwatervergelijkingen. Voor elke dwarsdoorsnede is onderscheid gemaakt tussen de hoofdgeul, de kribvakken en de niet alluviale stroomvoerende en waterbergende uiterwaarden. De sedimenttransportformule en de sedimentbalans worden gebruikt om de morfologische veranderingen te bepalen. Twee-dimensionale processen, zoals lateraal sedimenttransport vanuit hoofdgeul naar de uiterwaarden (en omgekeerd) en de asymmetrie van de dwarsdoorsnede, worden niet beschouwd. Het sedimenttransport vindt uitsluitend plaats in de hoofdgeul over de gespecificeerde sedimenttransporterende breedte en de voorspellingen van de morfologische veranderingen zijn over de dwarsdoorsnede gemiddeld.

De Nederlandse Rijntakken worden gekarakteriseerd door vele ruimtelijke variaties in dwarsdoorsnede. Dit betreft met name variatie in geometrie (zoals in uiterwaardbreedte, de aan- of afwezigheid van zomerkades, hoogwatervrije terreinen en bergende en stroomvoerende uiterwaarden), in vegetatietypen en waterbouwkundige constructies (zoals bodemschermen (Erlecom) en vaste lagen (Nijmegen en St. Andries)). Deze zijn geschematiseerd in het SOBEK Rijntakkenmodel. Elke variatie in geometrie introduceert lokale veranderingen in waterbeweging en sedimenttransport. Daardoor worden bodemgolven gegenereerd.

<sup>4</sup> Versie gebaseerd op versie 2000.3 met aanpassingen welke staan beschreven in de Memo 'Morfologische berekeningen t.b.v. PKB Ruimte voor de rivieren' van Kroekenstoel (2004).

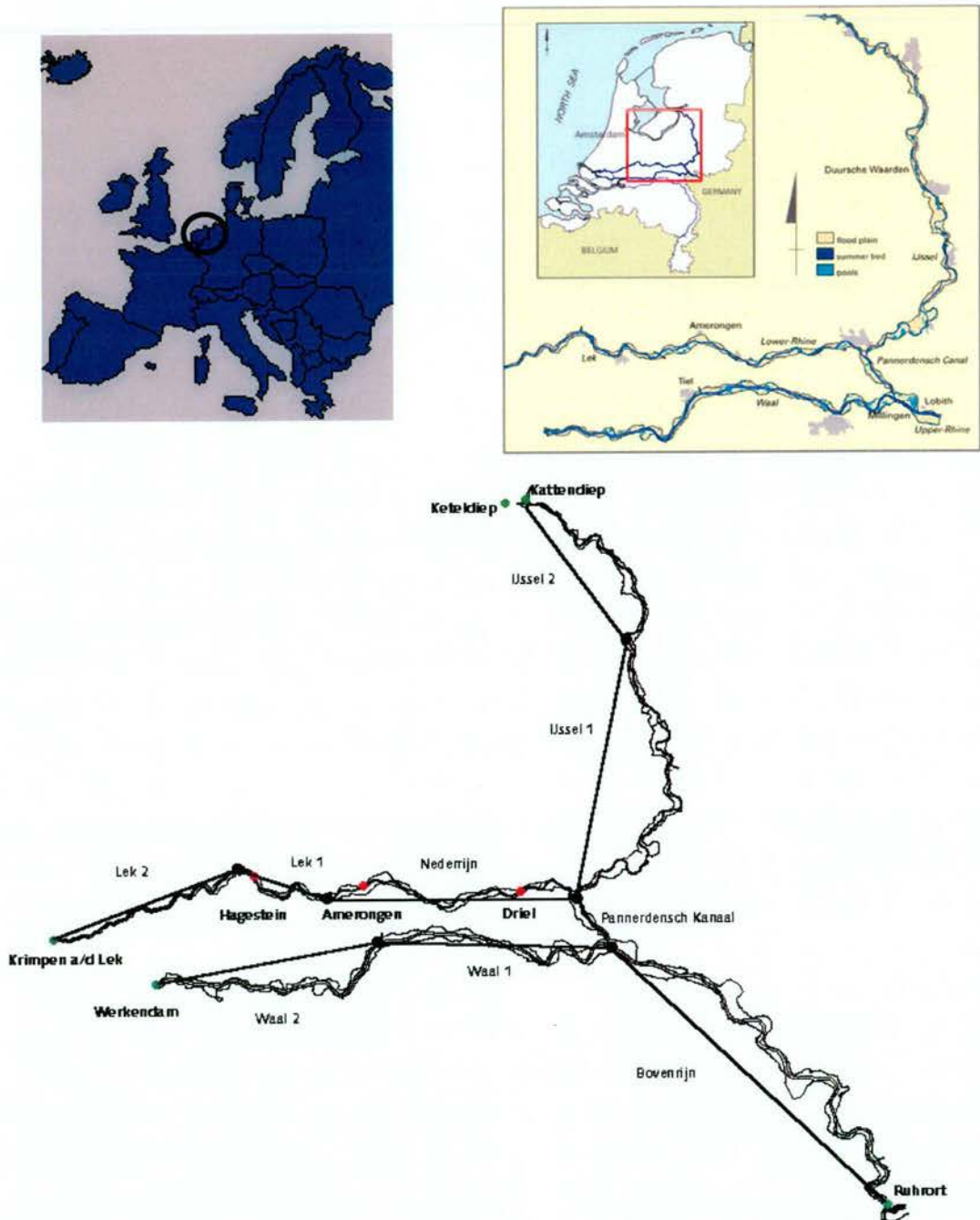
### 2.2.2 SOBEM-modellen basisalternatieven

De RvdR basisalternatieven (ruimtelijk alternatief en budgetalternatief) bestaan uit een mix van rivierverruimende maatregelen (zie ook Bijlage 1):

- technische maatregelen, waaronder dijkversterking;
- ruimtelijke maatregelen, zoals het stroomlijnen of verwijderen van hoogwatervrije terreinen, het graven van oever- en nevengeulen, het verlagen van zomerkaden en het afgraven van uiterwaarden en ontwikkelen tot natuur, etc.

De invloed van deze maatregelen zijn door Rijkswaterstaat RIZA in het SOBEM Rijntakkenmodel geschematiseerd met behulp van, met een 2D-model (WAQUA) berekende, veranderingen in (relatieve) hoofdgeulafvoer bij verschillende afvoerniveaus. Deze zijn vertaald naar waterstandsafhankelijke laterale afvoeren in het SOBEMmodel. Voor de Bovenrijn en Waal en de IJssel zijn de veranderingen in de (relatieve) hoofdgeulafvoer bij de afvoerniveaus van 1000, 2000, 3000 en 16000 m<sup>3</sup>/s (bepaald met de SOBEM-modellen) weergegeven in Bijlage 2.





Figuur 2-1. Nederlandse Rijntakken - de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdens Kanaal, de IJssel, de Nederrijn en de Lek en de schematisatie in het Rijntakkenmodel

Voor een uitgebreide beschrijving van het Rijntakkenmodel voor de uitgangssituatie en de modelaanpassingen voor de twee RvdR-basisalternatieven wordt verwezen naar Jesse & Kroekenstoel (2001), Kroekenstoel (2004) en Van Vuren et al. (2003).

## 2.3 Onzekerheid en Monte Carlo simulatie

### 2.3.1 Onzekerheid

Het toekomstige morfologische en hydraulische gedrag van de Rijntakken is onzeker doordat de rivier als natuurlijk systeem inherent onzeker is. Dit type onzekerheid komt voort uit tijdsafhankelijke en ruimteafhankelijke variaties in de natuur. Inherente onzekerheid in de tijd betekent dat de realisatie van een tijdsafhankelijk proces onzeker is. Hierbij valt te denken aan



het toekomstig afvoerverloop van de rivier. Inherente onzekerheid in de ruimte betekent dat een ruimteafhankelijk proces onzeker is. Een voorbeeld van dit type onzekerheid is de ruimtelijke verdeling van de korrelgrootte in de rivier. Als gevolg van verfijning van sediment in benedenstroomse richting, het ontstaan en uitdempen van bodempatronen en afpleisteringprocessen varieert de korrelgrootte sterk in de ruimte. Inherente onzekerheid kan niet worden gereduceerd en is inherent aan het natuurlijke systeem. Als gevolg hiervan zijn voorspellingen van deze natuurlijke processen met het Rijntakkenmodel inherent onzeker. Naast inherente onzekerheden worden riviervoorspellingen ook beïnvloed door onzekerheden in het model concept (o.a. keuze sedimenttransport formule en de numerieke oplossingsmethode). Al deze onzekerheden werken door in onzekerheden in de voorspelde bevaarbaarheid en baggervolumes.

In dit onderzoek zijn de onzekerheden die het gevolg zijn van het modelconcept (onzekerheden die geïntroduceerd zijn door de keuze van een 1D model, het modelleren van sedimenttransport met een empirische formule (aangepaste Meyer-Peter-Müller formule) en het toepassen van uniform in plaats van gegradeerd sediment) niet beschouwd. Van der Klis (2000 en 2003) en Van Vuren et al. (2002) laten zien dat de onzekerheid in de afvoerhydrograaf een relatief grote invloed heeft op de onzekerheid in morfologische voorspellingen (1D-voorspelde dwarsdoorsnede gemiddelde bodemveranderingen). Daarom wordt in dit onderzoek het effect van de onzekerheid in de afvoerhydrograaf op de bevaarbaarheid en baggervolumes beschouwd.

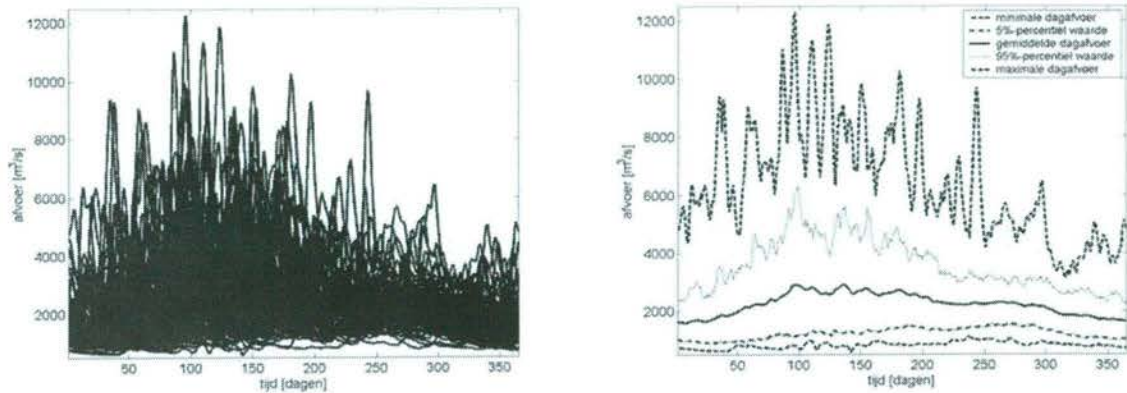
### 2.3.2 Monte Carlo simulatie en Bootstrap resampling techniek

Om het effect van de onzekerheid in het afvoerverloop op de bevaarbaarheid van de rivier en het benodigde onderhoudsbaggerwerk te onderzoeken, worden Monte Carlo simulaties (MCS) met het SOBEK Rijntakkenmodel uitgevoerd.

MCS (Hammersly & Handscomb, 1964) bestaat uit een groot aantal runs met het Rijntakkenmodel elk met een statistisch equivalente invoer. Voor elke simulatie wordt een nieuwe invoerreeks voor de hydraulische randvoorwaarde aan de bovenrand (afvoertijdreeks) gegenereerd met behulp van een re-sampling techniek. Dit leidt tot een groot aantal modeluitkomsten (morfologische en hydraulische resultaten als functie van plaats en tijd) die elk een even grote kans van voorkomen hebben. Een statistische analyse van alle modeluitkomsten geeft inzicht in de verwachtingswaarde en onzekerheden van rivierkundige voorspellingen.

Voor elke simulatie wordt een nieuwe afvoertijdreeks gespecificeerd op de bovenrand met behulp van re-sampling technieken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de dagelijkse gemeten rivierafvoer bij Lobith over de periode 1900-2000. In Efron (1982) worden twee belangrijke re-sampling technieken onderscheiden, te weten de Jack-Knife en de Bootstrap re-sampling techniek. Beide technieken kunnen worden toegepast om nieuwe afvoertijdreeksen te construeren door middel van re-sampling uit de originele dataset. Met de Jack-Knife techniek wordt een nieuwe tijdreeks geconstrueerd door uit de originele 100-jarige afvoertijdreeks een vast aantal jaarreeksen te verwijderen. Met de Bootstrap re-sampling techniek worden random jaarreeksen geselecteerd uit de 100-jarige afvoerreeks. Deze jaarreeksen vormen samen een nieuwe tijdreeks. In dit onderzoek wordt de Bootstrap re-sampling techniek toegepast. Om de random geselecteerde jaarreeksen goed op elkaar te laten aansluiten worden de reeksen geselecteerd uit de hydraulische afvoerjaarreeksen (lopend van 1 oktober tot 30 september), zie Figuur 2-2. Het grootste verschil tussen de afvoer op 30 september en 1 oktober (van een ander jaar) is  $4017 \text{ m}^3/\text{s}$  (maximaal waargenomen afvoer op 1 oktober is  $4747 \text{ m}^3/\text{s}$  (gemeten in 1968) en de minimale afvoer op 30 september is  $730 \text{ m}^3/\text{s}$  (gemeten in 1947)). Een dergelijke overgang in het afvoerniveau in een tijdsbestek van 1 dag is onrealistisch en zorgt voor modelinstabiliteit. Daarom is gekozen de jaarreeksen lopend van 5 oktober tot 30 september te combineren tot een nieuwe tijdreeks. Lineaire interpolatie in het SOBEKmodel tussen de afvoer van 30 september en 5 oktober zorgt voor een stabiel model.





Figuur 2-2. (a) jaarlijkse dagafvoertijdreeksen bij Lobith voor de periode 1900-2000. (b) statistische karakteristieken voor de dagafvoertijdreeks tijdens het hydraulische jaar.

Voorgaand onderzoek van Van Vuren (2003) en Van Vuren (2004) wijst uit dat de statistische karakteristieken van de morfologische voorspellingen, zoals het gemiddelde, de standaarddeviatie en de 5%- en 95%-percentiel waarden, bij een totaal aantal runs van 350 voldoende geconvergeerd zijn. In dit onderzoek wordt het aantal modelruns vastgesteld op 400.

### 2.3.3 Rekeningreductie en aanpassingen SOBEK Rijntakkenmodel

De combinatie van het aantal modelsimulaties en de rekestijd per simulatie met het Rijntakkenmodel maakt de toepassing van MCS erg rekenintensief. Een reductie van de rekestijd per simulatie zal de totale rekestijd reduceren. Deze reductie kan worden gerealiseerd door het vergroten van de rekestijdstap in het model of het verwijderen van rekenintensieve riviertakken uit het model. De rekestijdstap in het model bedraagt 1 dag. Bij het vergroten van deze tijdstap wordt het model instabiel. Deze instabiliteit wordt veroorzaakt door de hydraulische controllers (de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein) in de Nederrijn en de Lek. Deze controllers vereisen een relatief kleine rekestijdstap om instabiliteit in het model te voorkomen. Bovendien maken deze controllers het model rekenintensief. Door het verwijderen van de Nederrijn en Lek wordt de rekestijd verkleind en kan bovendien mogelijk de rekestijdstap van het model worden vergroot. De rekestijd per simulatie wordt hierdoor gereduceerd.

De takken Nederrijn van km 879 tot km 929 en de Lek zijn verwijderd uit het model. Op het overblijvende korte riviervoortraject van de Nederrijn met een lengte van 1000 m is een nieuwe benedenrand opgelegd. Er zijn testsimulaties uitgevoerd voor twee type randvoorwaarden: een Qh-relatie en een afvoertijdreeks (zie ook Bijlage 3). Er is uiteindelijk gekozen om op de nieuwe benedenrand een Qh-relatie op te leggen die volgt uit een hydraulische simulatie met het volledige Rijntakkenmodel. Met het verwijderen van de Nederrijn en de Lek wordt de rekestijd met 50% gereduceerd. Met het vergroten van de rekestijdstap van 1 dag naar 5 dagen wordt de rekestijd nog eens met 75% gereduceerd. Echter met het vergroten van de rekestijdstap nemen de verschillen tussen de resultaten met het volledige Rijntakkenmodel en het aangepaste model toe. Daarom is besloten de rekestijdstap gelijk te houden aan 1 dag.

## 2.4 Scheepvaart Rijntakken en methode ter bepaling van de bevaarbaarheid

### 2.4.1 Scheepvaartklasse en scheepvaarteisen

De rivieren de Rijn en de Maas vervullen een belangrijke rol in de Europese beroepsscheepvaart. Dankzij de ligging aan de monding van deze belangrijke Europese rivieren



is Nederland een natuurlijke toegangsweg voor een groot deel van het Europese vaste land. De verwachting is, dat in de toekomst zowel het aantal scheepvaartbewegingen als de getransporteerde vracht per schip nog aanzienlijk zullen toenemen. In het Tweede Structuurschema Verkeer en Vervoer (SVV 2) zijn de Bovenrijn en de Waal aangemerkt als hoofdtransportassen, ook wel achterlandverbindingen genoemd. Bijna de helft van het goederentransport van en naar Duitsland gaat via de Waal - Bovenrijn, de drukst bevaren rivier van West-Europa. De Bovenrijn, Waal, Nederrijn en Lek en de bedijkte Maas vormen de Oost-West assen in het goederentransport. De IJssel en de onbedijkte Maas zijn de vaarwegen voor het Noord-Zuid transport.

Veilige, vlotte en rendabele scheepvaart vereist een diepe en brede vaargeul, zodat de schepen zoveel mogelijk lading kunnen vervoeren en elkaar veilig kunnen passeren. In het Tweede Structuurschema Verkeer en Vervoer en het Nationaal Verkeer en Vervoerplan (NVVP) wordt per vaarweg aangegeven voor welke scheepvaartklasse de vaarweg geschikt moet zijn en aan welke condities de vaarweg voor deze scheepvaartklasse moet voldoen. Er worden eisen gesteld ten aanzien van vaarbaanbreedte en vaarbandiepte. De totale vereiste vaarbaanbreedte wordt bepaald door het aantal strooksverkeer van de betreffende scheepvaartklasse en de vereiste veiligheidsmarges (schrikafstand, kantstrook en middenstrook). De Bovenrijn en de Waal enerzijds en de IJssel anderzijds moeten bevaarbaar zijn voor respectievelijk tweestrooksverkeer van scheepvaartklasse VII en Va. De bijbehorende vaarbaaneisen staan in Tabel 2-1.

Riviertrajecten	vaarbaanbreedte $B_v$	vaarbandiepte $d_v$	schrikafstand $B_s$	Normaalbreedte $B_N$
Traject Waal 1	150 m	2,8 m	25 m	340 m
Traject Waal 2	150 m	2,8 m	25 m	260 m
Traject Waal 3	150 m	2,8 m	25 m	260 m
Traject Waal 4	150 m	2,8 m	25 m	260 - 340 m
Traject IJssel 1	40 m <sup>5</sup>	2,5 m	20 m	80 m
Traject IJssel 2	40 m <sup>3</sup>	2,5 m	20 m	80 - 100 m
Traject IJssel 3	40 m <sup>3</sup>	2,5 m	20 m	100 - 130 m
Traject IJssel 4	40 m <sup>3</sup>	2,5 m	20 m	130 - 160 m

Tabel 2-1: vaarbaaneisen en afmetingen Rijntakken.

Op de IJssel-trajecten is de vereiste vaarbaanbreedte afhankelijk van de bochtstraal. Bochten met een grote bochtstraal hebben minder vaarwegbreedte nodig dan bochten met een kleine bochtstraal. Op de Waal-trajecten is de rivier in alle rivierbochten breed genoeg voor dubbelstrooksverkeer van scheepvaartklasse VII. Voor zowel de Bovenrijn en de Waal als de IJssel wordt een schrikafstand in acht genomen. In dit onderzoek wordt geen rekening gehouden met een kantstrook en een middenstrook.

#### 2.4.2 Methode ter bepaling van de bevaarbaarheid

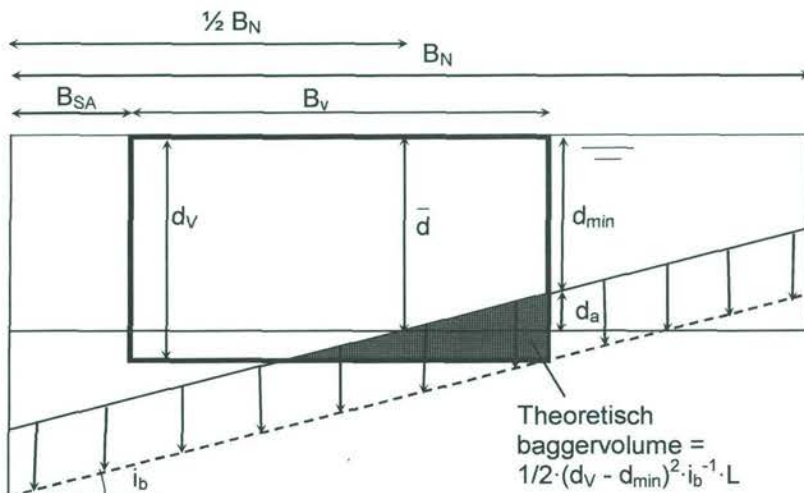
De morfologische en hydraulische effecten in de uitgangssituatie en voor de basisalternatieven moeten worden vertaald naar de bevaarbaarheid van de rivier en de vereiste baggervolumes als functie van ruimte en tijd. In de praktijk wordt baggerwerk uitgevoerd als op een bepaald moment ergens in de rivier een ondiepte ontstaat of dreigt te ontstaan. Om de bevaarbaarheid van de rivier en het vereiste onderhoudsbaggerwerk te analyseren zijn de scheepsklassen en

<sup>5</sup> Op de IJssel-trajecten is de vereiste vaarbaanbreedte afhankelijk van de bochtstraal. Een formele norm voor deze bochtstraalafhankelijke vaarbaanbreedtes ontbreekt. In dit onderzoek worden de normen uit WL-Delft Hydraulics (2003) gebruikt. Hierin zijn voor riviertrajecten met rechtstanden en bochtstralen tussen de 800-280 m breedte-eisen voor het vaarbaanprofiel op de IJssel gespecificeerd; N.B. voor bochtstralen respectievelijk kleiner dan of gelijk aan 280 m, 400 m, 500 m, 600 m, 700 m en 800 m (en rechtstanden) is de vaarbaanbreedte gelijk aan 75 m, 62 m, 54 m, 50 m en 48 m. Indien deze breedte-eis groter is dan de lokale normaalbreedte verminderd met tweemaal de schrikafstand, dan wordt de breedte vastgesteld op de lokale normaalbreedte verminderd met tweemaal de schrikafstand.



eisen die deze scheepsklassen aan de rivier als vaarweg stellen, voor de Rijntakken vastgesteld (zie vorige paragraaf).

Voor de Nederlandse Rijntakken geldt, dat de rivier als vaarweg bij een afvoer groter dan de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA<sup>6</sup>) bevaarbaar moet zijn voor de vereiste scheepsklasse met een vereiste vaardiepte  $d_v$  en vaarbaanbreedte  $B_v$  ('bak-profiel' in Figuur 2-3).



Figuur 2-3. vereiste vaarbaanprofiel en dwarsdoorsnede van de rivier.

De analyse naar de bevaarbaarheid van de rivier wordt uitgevoerd met het 1D-model, terwijl de bodemligging voor scheepvaart in principe ruimtelijk (2D) geanalyseerd dient te worden. Scheepvaartknelpunten ontstaan onder andere door ondiepten in de binnenbocht van rivierbochten als gevolg van het bodemdwaarsverhang. Het bodemdwaarsverhang in een rivierbocht neemt af als de bochtstraal toeneemt. Om voor de toetsing van de bevaarbaarheid rekening te houden met het bodemdwaarsverhang worden de zomerbed-gemiddelde waterdiepten  $\bar{d}(x,t)$ , die met het 1D-model worden voorspeld, als volgt gecorrigeerd:

$$d_{min}(x,t) = \bar{d}(x,t) + d_a = \bar{d}(x,t) + \left( \frac{B_N(x)}{2} - B_{SA}(x) - B_v(x) \right) i_b(x) \tag{1}$$

Hierin is  $d_{min}(x,t)$ , de representatieve minimale waterdiepte in de vaargeul van de dwarsdoorsnede op locatie  $x$  op tijdstip  $t$ ,  $d_a$  de correctie op de zomerbed-gemiddelde waterdiepte doordat de rivierbodem een dwarsverhang  $i_b$  aanneemt,  $B_N$  de normaalbreedte van de rivier,  $B_{SA}$  de schrikafstand vanaf de normaallijn vanaf waar de vaargeul is gedefinieerd.

Het bodemdwaarsverhang (en voor de IJssel ook de vereiste vaarbaanbreedte (zie Tabel 2-1)) is afhankelijk van de bochtstraal in de rivier. Hoe kleiner de bochtstraal, hoe groter het dwarsverhang (en de vereiste vaarbaanbreedte). De correctie op de zomerbed-gemiddelde waterdiepte  $d_a$  is dus een functie van de rivierlocatie.

Het bodemdwaarsverhang  $i_b$  kan met behulp van bodempeilingen worden afgeleid of kan met behulp van een gegeven bochtstraal  $R_b$  analytisch worden bepaald (Talmon et al., 1995):

<sup>6</sup> de Overeengekomen Laagwater Afvoer (OLA) is de 5%-onderschrijdingskans van de dagafvoergemiddelde-waarden in een bepaalde meetperiode. De OLA wordt elke tien jaar vastgesteld. In 2002 is de OLA voor Lobith voor het laatst vastgesteld met behulp van de dagafvoergemiddelde-waarden in de periode 1901-2000. De OLA komt overeen met 1020 m<sup>3</sup>/s. Voor de IJssel is de OLA gelijk aan 172 m<sup>3</sup>/s (Stuurman en Koolwijk, 2003).

$$\tan(i_b) = A \cdot f(\theta) \cdot \frac{h}{R_B} \quad (2)$$

Hierin is  $f(\theta)$  een functie van de Shieldsparameter en beschrijft het effect van het dwarsverhang op de richting van het sedimenttransport,  $h$  de waterdiepte en  $A$  de spiraalstromingscoëfficiënt die gedefinieerd is als:

$$A = \frac{2\varepsilon}{\kappa^2} \left( 1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (3)$$

Hierin is  $\varepsilon$  de calibratiefactor ( $\sim 1$ ),  $\kappa$  de Von Karman coëfficiënt ( $\sim 0.4$ ),  $g$  de gravitatie versnelling en  $C$  de Chézy ruwheidscoëfficiënt. De functie  $f(\theta)$  is als volgt gedefinieerd:

$$f(\theta) = 9 \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} \sqrt{\theta} \quad (4)$$

Hierin is  $D_{50}$  de korreldiameter waarvoor geldt dat 50% van het bodemmateriaal kleiner is. Kortom, het dwarsverhang dat gebruik wordt om de waterdiepte-correctie  $d_a$  te bepalen is een functie van de bochtstraal  $R_B$ , de tijd- en plaatsafhankelijke waterdiepte  $h$ , de Chézy ruwheidcoëfficiënt  $C$ , de Shieldsschuifspanning  $\theta$  en de korreldiameter  $D_{50}$ . De berekende waarde  $i_b$  is een evenwichtswaarde die wordt bereikt als de parameters over een lang traject en over grote bochtverdraaiingshoeken constant zijn. Dit zal nooit het geval zijn. Derhalve jilt  $i_b$  altijd na bij de hydraulische variabelen en verschillende parameters, zoals de bochtstraal en de waterdiepte. De geldigheid van de axiaalsymmetrische oplossing van het 'evenwichtsdwarsverhang' en de gevoeligheid van de correctie-formule op de bevaarbaarheid is in dit onderzoek niet nader onderzocht. Aanvullend onderzoek daarnaar wordt echter aanbevolen.

Voor de Bovenrijn en de Waal is het dwarsverhang per rivierkilometer afgeleid uit multibeam bodempeilingen<sup>7</sup> en analytisch bepaald met formule (2) bij een karakteristieke Waal afvoer van 1800 m<sup>3</sup>/s<sup>8</sup>. De uit metingen afgeleide en analytisch berekende dwarsverhangen zijn weergegeven in Figuur 2-4a. De analytisch berekende dwarsverhangen zijn iets groter dan de dwarsverhangen die zijn afgeleid uit multibeam bodempeilingen, maar volgen de gemeten tendens redelijk goed. Voor de IJssel zijn de dwarsverhangen afgeleid uit bodemmetingen niet beschikbaar. Gezien de redelijke overeenstemming van Bovenrijn en Waal wordt in het vervolg van dit onderzoek voor alle Rijntakken gebruik gemaakt van de analytisch afgeleide dwarsverhangen. De analytisch afgeleide dwarsverhangen voor de IJssel zijn te zien in Figuur 2-4b. Met behulp van de analytisch bepaalde dwarsverhangen is per rivierkilometer de correctie op de zomerbed-gemiddelde waterdiepte bepaald. Deze staan voor de Bovenrijn, Waal en IJssel in Figuur 2-5 en Figuur 2-6.

Op de Waal zijn ten behoeve van de scheepvaart, bodemconstructies (bodemschermen en vaste lagen) aangebracht in de scherpe rivierbochten Erlecom (km 873-876), Nijmegen (km 883-885) en St. Andries (km 924-928). Er is besloten op deze locaties geen waterdiepte-correctie toe te passen, omdat het bodemdwaarsverhang daar sterk wordt beïnvloed door de bodemconstructies.

RIZA (RIZA, 2004) heeft in haar studie ten aanzien van de 1D-waterdiepte-correctie de volgende aannames gedaan:

<sup>7</sup> gegevens afkomstig uit database RIZA.

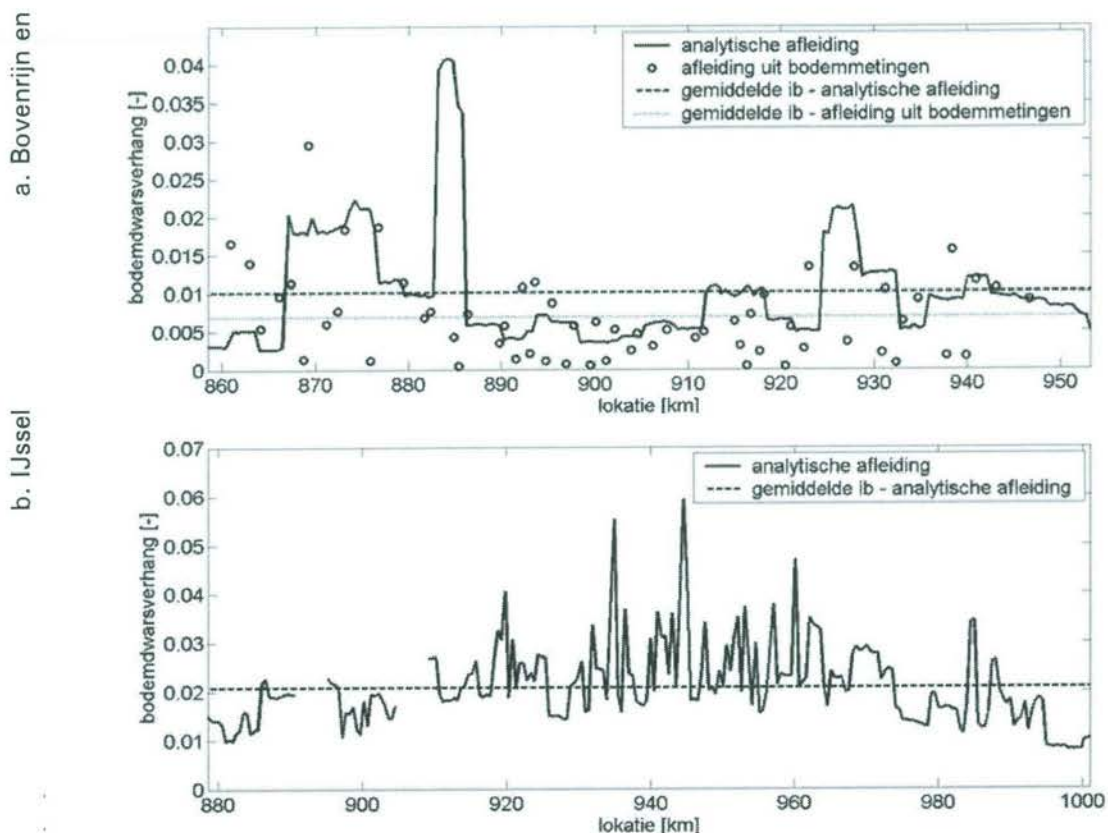
<sup>8</sup> bijbehorende afvoer op de bovenrand van het model is 2700 m<sup>3</sup>/s.



- op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel is het bodemdwaarsverhang constant en gelijk aan 0,02.
- op de Bovenrijn en de Waal is de vaarwegbreedte gelijk aan 150 m. De vaarwegbreedte op de IJssel is gelijkgesteld aan de minimale normaalbreedte op de IJssel verminderd met tweemaal de schrikafstand. Dit komt overeen met een breedte van 40 m.
- de normaalbreedte in de Rijn varieert per riviertraject en per rivierlocatie (zie Tabel 2-1). Voor elk riviertraject is een constante normaalbreedte aangenomen die gelijk is aan de gemiddelde normaalbreedte in dat traject. Voor Waaltrajecten 1-4 zijn de gemiddelde normaalbreedten gelijk aan 340 m, 260 m, 260 m en 300 m. Voor de IJsseltrajecten 1-4 zijn de gemiddelde normaalbreedten gelijk aan 80 m, 90 m, 115 m en 145 m.

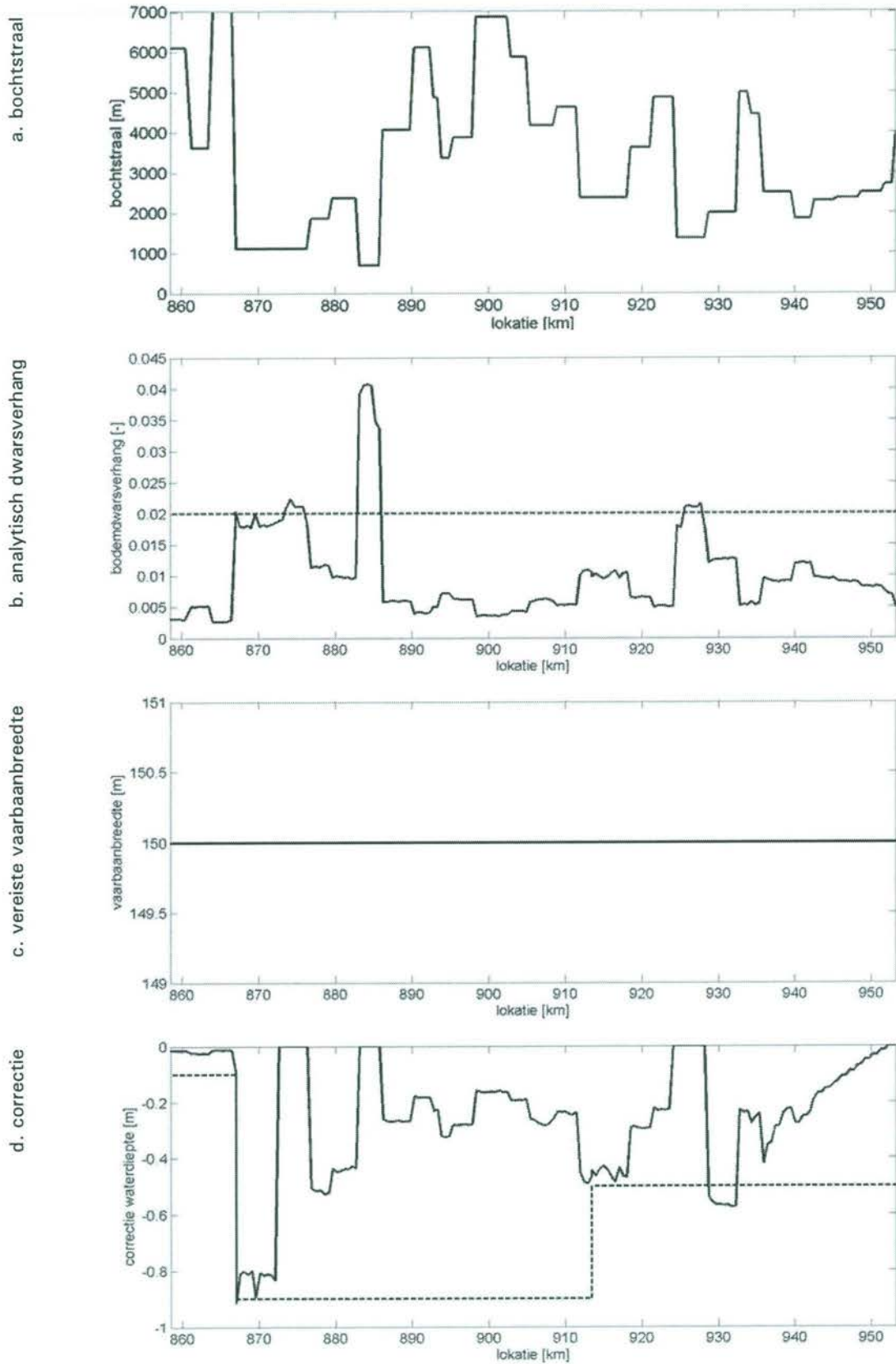
De bovenstaande aannames van RIZA resulteren in constante waterdiepte-correcties per riviertraject. Voor de Waaltrajecten zijn deze gelijk aan -0,1 m, -0,9 m, -0,9 m en -0,5 m. Voor de IJsseltrajecten zijn deze gelijk aan -0,4 m, -0,3 m, -0,05 m en 0,25 m. De stippellijnen in Figuur 2-5 en Figuur 2-6 geven de waarden weer die RIZA in haar onderzoek heeft gehanteerd.

Voor de Bovenrijn en de Waal is het dwarsverhang van 0,02 dat door RIZA wordt gehanteerd tweemaal zo groot als het gemiddelde dwarsverhang dat met de analytische formule is bepaald. Voor de IJssel komt het dwarsverhang van RIZA overeen met het gemiddelde dwarsverhang dat met de analytische formule is bepaald. De waterdiepte-correcties op de Bovenrijn en de Waal door RIZA zijn groter dan op grond van de analytische formule is bepaald. Op de IJssel geldt dat de waterdiepte-correcties van RIZA juist kleiner zijn dan de correcties die met de analytische formule zijn bepaald. Dit is het gevolg van de constante vaarbaanbreedte van 40 m, terwijl in de huidige studie grotere vaarbaanbreedtes zijn aangehouden waar dat mogelijk is. Een ander belangrijk verschil tussen de methode van RIZA en de hier gehanteerde aanpak is verder dat met de toepassing van de analytische formule voor de correctie rekening wordt gehouden met bochtige en minder bochtige riviertrajecten in plaats van een constante correctie per riviertraject.

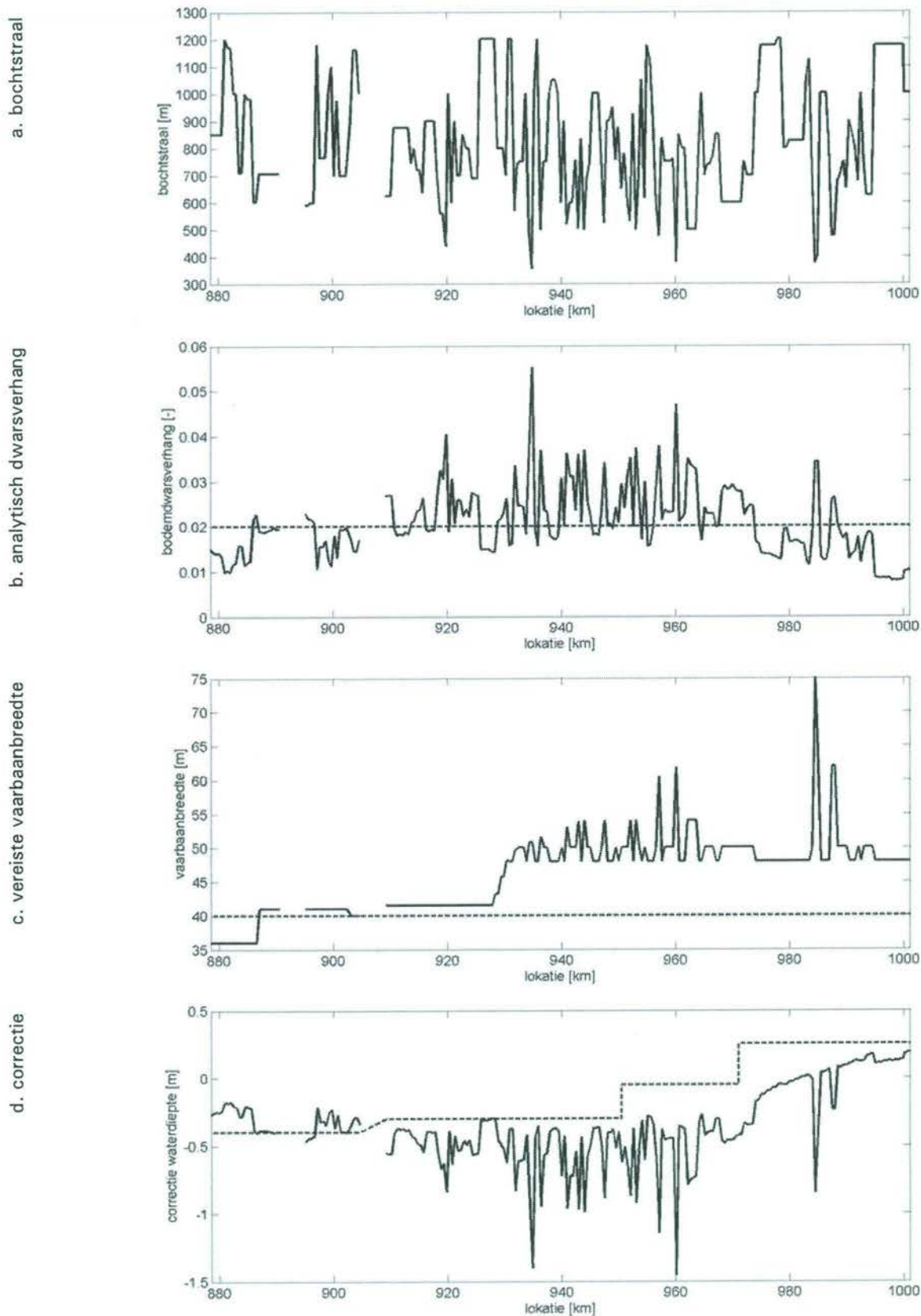


Figuur 2-4. (a) de 'gemeten' en de analytisch bepaalde dwarsverhangen per rivierkilometer voor de Bovenrijn en de Waal. (b) de analytisch bepaalde dwarsverhangen per rivierkilometer voor de IJssel.





Figuur 2-5. (a) de bochtstraal, (b) de analytisch bepaalde dwarsverhangen, (c) de vereiste vaarbaanbreedte en (d) de correctie op de zomerbed-gemiddelde waterdiepte per rivierkilometer voor de Bovenrijn en de Waal. - - - lijn uit RIZA-studie



Figuur 2-6. (a) de bochtstraal, (b) de analytisch bepaalde dwarsverhangen, (c) de vereiste vaarbaanbreedte en (d) de correctie op de zomerbed-gemiddelde waterdiepte per rivierkilometer voor de IJssel. - - - lijn uit RIZA-studie



De representatieve minimale waterdiepte in de vaargeul van de dwarsdoorsnede op een willekeurige rivierlocatie  $x$  moet tijdens een afvoer groter dan OLA groter zijn dan de vereiste vaardiepte behorende bij de scheepvaartklasse die geldt op die locatie. Indien deze vereiste vaardiepte wordt onderschreden, dan wordt niet aan de scheepvaarteisen voldaan en is onderhoudsbaggerwerk vereist om de vaarbaan op diepte te brengen. De eerste scheepvaartbeperkingen treden echter al eerder op, omdat schepen veelal een grotere maximale vaardiepte hebben dan die behorende bij de scheepvaart-eis van de vaarweg. Daarom wordt de bevaarbaarheid niet alleen onderzocht voor de scheepvaartklasse-diepte-eis, maar ook voor vaardieptes variërend tussen 1,5 en 5 m.

Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de hydraulische en morfologische resultaten die volgen uit de MCS met het Rijntakkenmodel. Voor iedere modelsimulatie worden de resultaten als functie van ruimte en tijd gearhiveerd. Zo kan per tijdstip voor alle locaties achteraf worden vastgesteld of de rivierlocatie bevaarbaar was voor een bepaalde vaarbaandiepte. Met een statistische nabewerking van de resultaten van alle modelsimulaties kunnen de statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per riviertraject (zie Tabel 1-1) en voor elke rivierlocatie bij een variërende vaarbaandiepte worden bepaald. Zo kunnen de trajecten en de locaties met de grootste scheepvaartbeperkingen worden vastgesteld.

De analyse wordt ten eerste uitgevoerd voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven zonder onderhoudsbaggerwerk. Met behulp van het berekende onderhoudsbaggerwerk (zie de methode die beschreven is in Paragraaf 2.5) wordt vervolgens bepaald hoe de bevaarbaarheidspercentages verbeteren door het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk.

## 2.5 Methode ter bepaling van het onderhoudsbaggerwerk

### 2.5.1 Baggerstrategie en volumebepaling

Het moment waarop in de praktijk wordt besloten tot het verrichten van baggerwerk is afhankelijk van de baggerstrategie (correctief of preventief) en de randvoorwaarden waaraan de rivier als vaarweg moet voldoen (eisen ten aanzien van vaarbaanbreedte en -diepte). In dit onderzoek is gekozen voor een correctieve baggerstrategie. Dit sluit aan bij de praktijk van het huidige baggerbeleid. De scheepvaarteisen zijn in de vorige Paragraaf besproken. Indien de vereiste vaarbaandiepte bij een afvoer groter dan de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) wordt onderschreden is baggerwerk vereist. De huidig gehanteerde baggerstrategie voor de Nederlandse Rijntakken houdt in dat, als de afvoer bij Lobith na het hoogwaterseizoen na 1 mei daalt onder een grensafvoer<sup>9</sup> van 3000 m<sup>3</sup>/s, getoetst wordt of de vaarbaan nog aan de gestelde vaarbaaneisen voldoet (zie baggerbestek - RWS-DON). Indien niet aan de eisen wordt voldaan, wordt er baggerwerk uitgevoerd tot dat de vaarweg weer aan het vereiste vaarbaanprofiel voldoet. Dit onderhoudsbaggerwerk wordt profielbaggeren genoemd. Daalt de afvoer vervolgens gedurende het laagwaterseizoen onder de 2000 m<sup>3</sup>/s, dan wordt, indien nodig, onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd om de vaarweg op het vereiste vaarbaanprofiel te houden.

Voor het bepalen van het vereiste baggeronderhoudswerk worden MCS uitgevoerd met het Rijntakkenmodel. In dit onderzoek beperken we ons tot het bepalen van het onderhoudsbaggerwerk dat onder profielbaggerwerk valt. Het vervolgens onderhouden van het vaarbaanprofiel bij afvoeren lager dan 2000 m<sup>3</sup>/s gedurende het laagwaterseizoen wordt vanwege de rekenintensiviteit van MCS buiten beschouwing gelaten.

Conform het baggerbestek, wordt voor elke modelsimulatie van 15 jaar jaarlijks getoetst of de vaarbaan aan de vaarbaaneisen voldoet. Indien niet aan de eisen wordt voldaan, wordt het

<sup>9</sup> NB de grensafvoer is bedoeld als indicator. Of er werkelijk problemen ontstaan hangt af van de actuele vaarbaandiepte en breedte.



vereiste baggervolume bepaald. Ten behoeve van deze toets worden, op het moment dat de afvoer na 1 mei onder de grensafvoer van 3000 m<sup>3</sup>/s daalt, de representatieve dwarsdoorsnede gemiddelde waterdiepten langs de rivier bij de OLA bepaald. Indien de vereiste vaarbandiepte op rivierlocatie  $x$  door de berekende representatieve waterdiepte in de vaarweg wordt onderschreden, dan is het minimaal vereiste baggervolume  $V_{B_r}(x, t)$  gelijk aan (zie gearceerde vlak in Figuur 2-3):

$$V_{B_r}(x, t) = \frac{1}{2} \cdot (d_v(x) - d_{\min}(x, t))^2 \cdot i_b(x)^{-1} \cdot L(x) \quad (5)$$

Hierin is  $L(x)$  de lengte van het riviervak op rivierlocatie  $x$ .

Het baggervolume kan door middel van een sedimentonttrekking uit het riviersysteem worden verwijderd. Echter, het 1D-Rijntakkenmodel geeft voorspellingen van de zomerbed-gemiddelde bodemligging (zie Paragraaf 2.2). Een sedimentonttrekking wordt in het model gelijkmatig verdeeld over het sedimenttransporterende deel van het dwarsprofiel. Als gevolg hiervan zal het zo zijn dat het profiel op het tijdstip direct na de sedimentonttrekking niet meer aan de eisen voldoet. Het is dus niet mogelijk alleen het 'gearceerde vlak' uit het dwarsprofiel te verwijderen. Er is derhalve gekozen om gedurende de simulatie het profiel over de sedimenttransporterende breedte  $B_s(x)$  met  $d_v(x) - d_{\min}(x, t)$  te verlagen (zie weer Figuur 2-3):

$$V_B(x, t) = (d_v(x) - d_{\min}(x, t)) \cdot B_s(x) \cdot L(x) \quad (6)$$

Aangezien deze methode leidt tot een overschatting van het baggervolume is besloten geen rekening te houden met een eventuele te baggeren overdiepte. Het baggervolume wordt middels een sedimentonttrekking in een periode van 30 dagen uit het riviersysteem verwijderd.

## 2.5.2 Terugstortstrategie

Vanaf begin jaren '90 is in Nederland een nieuw baggerbeleid van kracht: baggeren in de rivier voor scheepvaartdoeleinden is toegestaan, maar het totaal verwijderde baggervolume moet elders in de rivier worden teruggestort, om verdere bodemdaling te beperken. Om hier rekening mee te houden stellen we voor de baggerhoeveelheden afkomstig van locatie  $x$  terug te storten. Dit is de locatie met de grootste beschikbare waterdiepte (mits groter dan de minst toelaatbare waterdiepte) in het traject 1,5 km - 5 km bovenstrooms van locatie  $x$ . De keuze van de plaats en de grootte van dit traject heeft effect op de totale vaarafstand tussen de baggerlocaties en de terugstortlocaties, maar kan indirect ook de vereiste baggervolumes beïnvloeden. Indien het terugstorttraject dicht bij de baggerlocatie  $x$  wordt gekozen kan het teruggestorte sediment in de nabije toekomst weer problemen opleveren voor locatie  $x$ . Het terugstorttraject van 1,5 km - 5 km bovenstrooms van locatie  $x$  is gekozen op basis van praktijk-ervaringen. Mocht dit traject onvoldoende terugstortruimte bevatten, dan wordt het overige volume teruggestort op de eerste locatie bovenstrooms van het betreffende traject met voldoende ruimte. Mocht dit betekenen dat voor de IJssel (respectievelijk de Waal) geen ruimte is binnen het eigen riviertraject, dan zal het verder bovenstrooms worden gestort op het Pannerdens Kanaal en de Bovenrijn. Er wordt aangenomen dat het volume dat op één locatie gebaggerd wordt ook op één locatie wordt teruggestort.

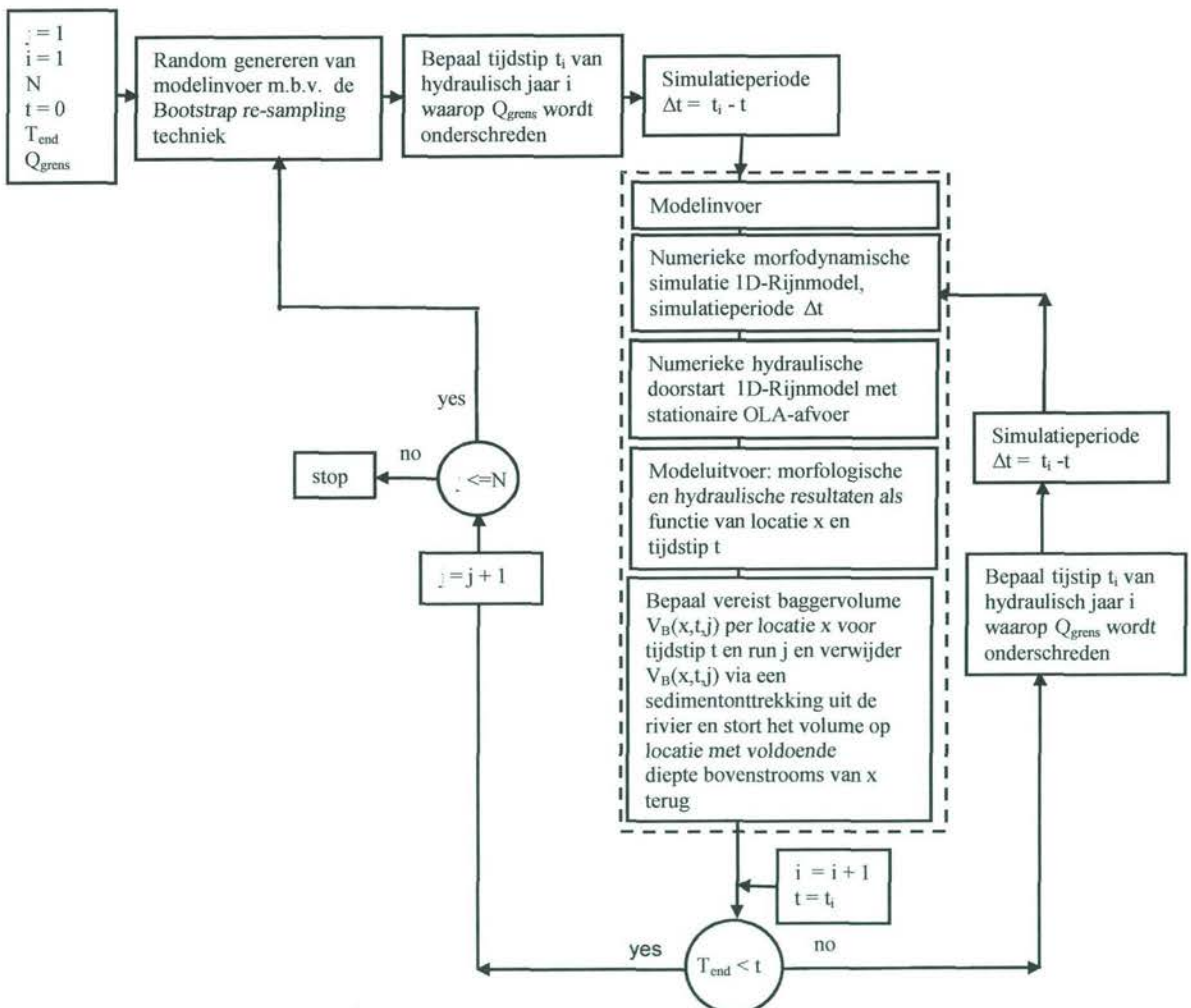
Het baggervolume dat in 'werkelijkheid' zou moeten worden gebaggerd, het baggervolume dat gedurende de simulaties is gebaggerd, het terugstortvolume en de stortlocaties worden gearciveerd, zodat achteraf de statistische karakteristieken van het onderhoudsbaggerwerk, het terugstortvolume en de afstand tussen de baggerlocaties en de terugstortlocaties kunnen worden bepaald.



### 2.5.3 Samenvatting reken- en analyseproces

Samengevat ziet de procedure voor de gehele rekencyclus er als volgt uit (zie Figuur 2-7):

1. Het specificeren van randvoorwaarden ten aanzien van onder andere het aantal modelruns  $N$  binnen de MCS ( $N=400$  runs), de totale simulatieperiode  $T_{sim}$  waarover de bevaarbaarheid en het vereiste onderhoudsbaggerwerk wordt geanalyseerd ( $T_{sim} = 15$  jaar, waarvan de eerste 5 jaren beschouwd zijn als inspeelperiode), het random genereren van afvoertijdreeksen (hiervoor wordt de Bootstrap re-sampling techniek toegepast), de scheepvaartklasse waarvoor de rivier bevaarbaar moet zijn en de bijbehorende vaarbaaneisen (zie Paragraaf 2.4.1), de aannames die worden gemaakt ten aanzien van het dwarsverhang per rivierlocatie (zie Paragraaf 2.4.2), de grensafvoer  $Q_g$  beneden welke de vaarweg getoetst wordt aan de vaarbaaneisen en het eventuele vereiste baggerwerk wordt uitgevoerd ( $Q_g = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
2. Het random genereren van een afvoertijdreeks met en het bepalen van het jaarlijkse bagger- en stortvolume per rivierlocatie gedurende een periode van 15 jaar met behulp van het Rijntakkenmodel.
3. Een statistische nabewerking om de onzekerheid in het bagger- en terugstortvolume te kwantificeren.



Figuur 2-7. stochastische methode om het onderhoudsbaggerwerk in de Rijntakken te bepalen.

Bovenstaande analyse wordt toegepast op de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven. De toets voor onderhoudsbaggerwerk wordt uitgevoerd voor de IJssel, de Waal en de

Bovenrijn. Er wordt geen toets uitgevoerd voor de Nederrijn, Lek en het Pannerdens Kanaal (zie uitgangspunten in Paragraaf 1.3).



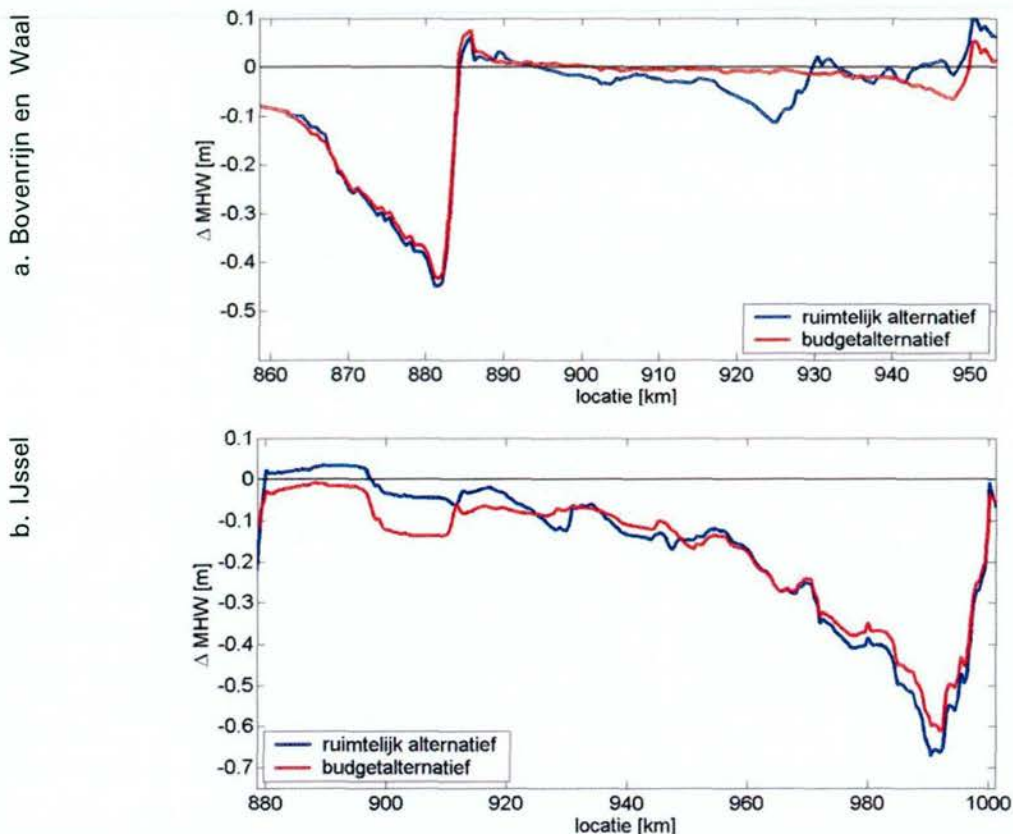
## 3 Hydraulische en morfologische effecten Ruimte voor de Rivier basisalternatieven

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de hydraulische en morfologische effecten van de maatregelen, die in de RvdR-alternatieven zijn voorgesteld, geanalyseerd. De hydraulische effecten bij een afvoer met een overschrijdingskans van 1/1250 per jaar, de Maatgevende Hoogwaterafvoer (MHW-afvoer), zijn weergegeven in Paragraaf 3.2. Hierbij is met name naar het effect op de waterstanden en de afvoerverdeling op de Rijntakken tijdens de MHW-afvoer gekeken. Onzekerheden in de hydraulische effecten zijn niet beschouwd. In Paragraaf 3.3 is de invloed van een onzeker afvoerverloop op de morfologische ontwikkeling van de rivier in de uitgangssituatie en de RvdR-alternatieven geanalyseerd. In het model zijn geen sedimentonttrekkingen opgenomen om het onderhoudsbaggerwerk ten behoeve van de scheepvaart te modelleren. Dat stuk van het onderzoek komt in Hoofdstuk 5 aan de orde. De berekeningen uit dit hoofdstuk worden gebruikt om het effect van de basisalternatieven op de bevaarbaarheid te illustreren (Hoofdstuk 4).

### 3.2 Hydraulische effecten

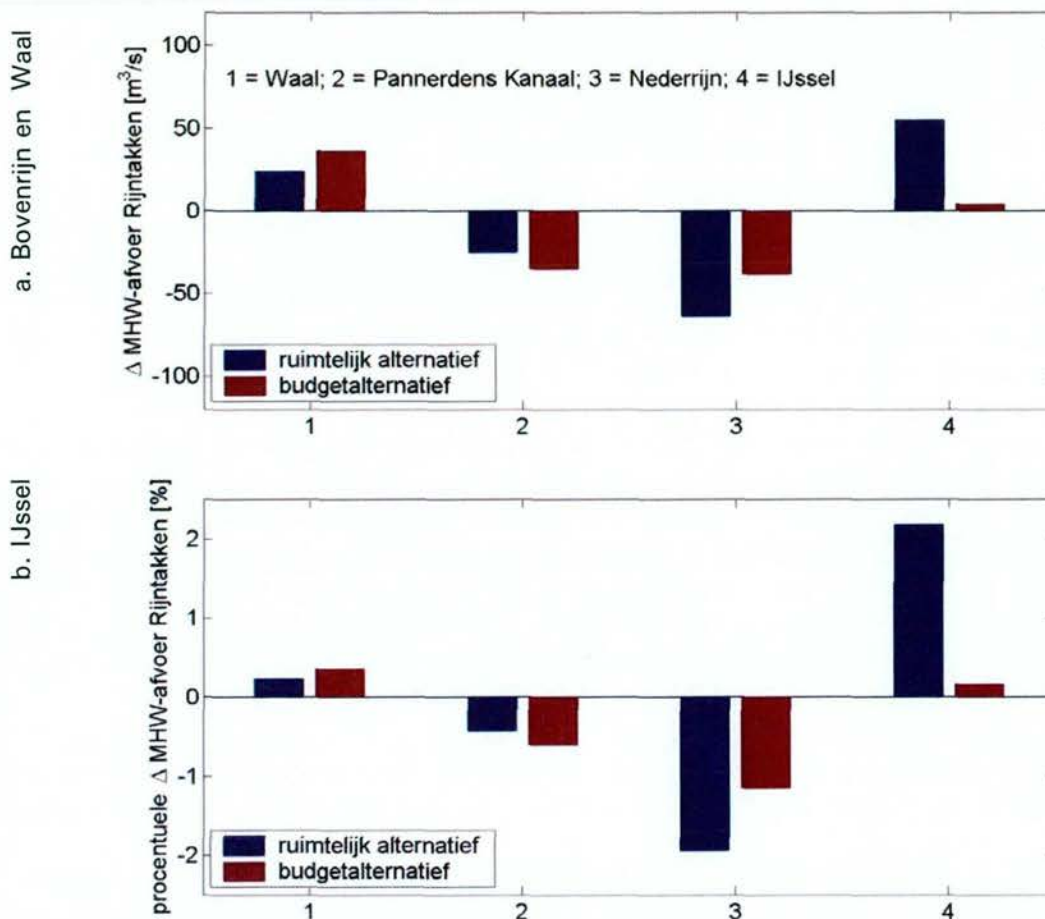
De ruimtelijke maatregelen van de alternatieven hebben een waterstandverlagend effect, dat vele kilometers doorwerkt in bovenstroomse richting. Het effect op de waterstanden tijdens de maatgevende hoogwaterafvoer van 16000 m<sup>3</sup>/s zijn voor het ruimtelijk alternatief en het budgetalternatief weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1. reductie in Maatgevend Hoogwaterstanden aan het begin van de berekeningsperiode voor het ruimtelijk alternatief en het budgetalternatief t.o.v. de uitgangssituatie: (a) voor de Bovenrijn en de Waal en (b) voor de IJssel.

Op de Bovenrijn, Waal en IJssel is een afname van MHW-standen te zien. De lokale toename van waterstanden op het bovenstroomse deel van de IJssel voor het ruimtelijke alternatief wordt veroorzaakt door een toename van de afvoer op de IJssel tijdens maatgevend hoogwater, zie Figuur 3-2. Deze figuur laat de absolute en procentuele verandering in MHW-afvoer ten opzichte van de uitgangssituatie zien voor zowel IJssel als Waal. Echter, dit wil niet zeggen dat de afvoer op de Rijntakken over de gehele afvoerrange bij Lobith op dezelfde wijze verandert. De absolute en procentuele veranderingen in afvoeren op de Rijntakken voor een afvoerrange van 600 tot 16000 m<sup>3</sup>/s op de Bovenrijn bij Lobith in Bijlage 2 laten zien dat de afvoer op de Rijntakken afwisselend stijgt en daalt als gevolg van de ruimtelijke maatregelen.





Figuur 3-2. (a) absolute en (b) procentuele verandering in afvoer op de Rijntakken t.o.v. de uitgangssituatie aan het begin van de berekeningsperiode voor het ruimtelijk alternatief en het budgetalternatief voor Maatgevend Hoogwater.

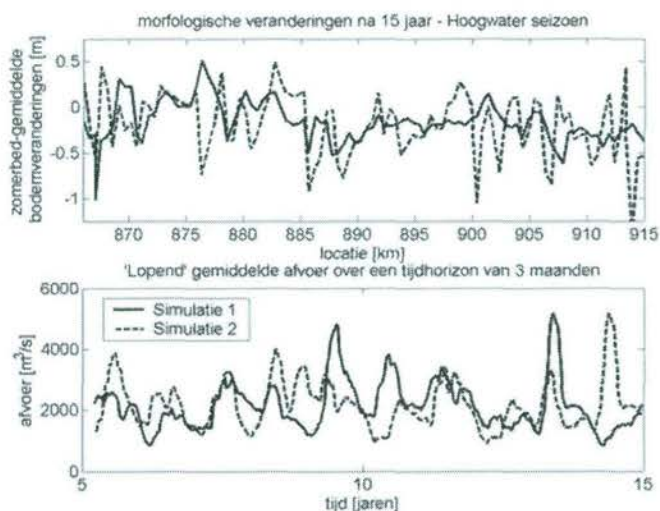
### 3.3 Morfologische effecten

#### 3.3.1 Uitgangssituatie

Naast het hydraulische effect leiden de RvdR-maatregelen ook tot een morfologische reactie van de rivier in de vorm van sedimentatie en erosie in het zomerbed. Deze reactie wordt ook voorspeld met het SOBEK Rijntakkenmodel. De invloed van een onzeker afvoerloop op de morfologische ontwikkeling in het zomerbed van de rivier als gevolg van de rivierverruimende maatregelen die zijn voorgesteld in het ruimtelijk alternatief en het budgetalternatief is zoals gezegd onderzocht met behulp van Monte Carlo simulaties.

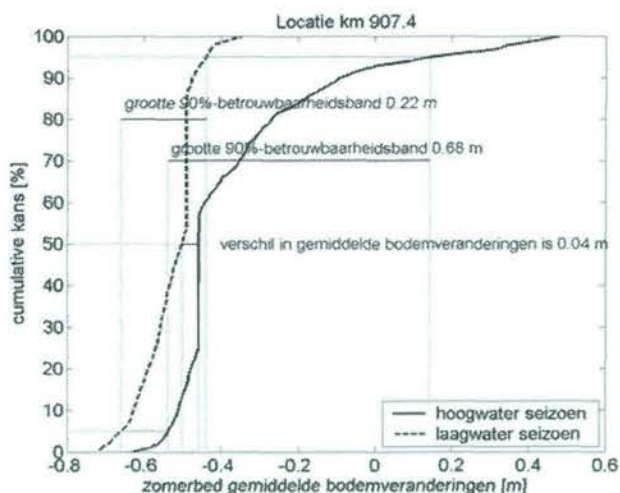
Het stochastische gedrag van morfologische veranderingen in de hoofdgeul van de Bovenrijn, de Waal en de IJssel is geanalyseerd op basis van 400 modelruns, die elk een berekeningsperiode van 15 jaar omvatten. Voor elke modelrun is random een afvoertijdreeks gegenereerd (zie Paragraaf 2.3.2). Dit resulteert in een morfologische ontwikkeling die slechts één mogelijke toekomstige situatie weergeeft. De morfologische situatie op een willekeurig tijdstip is sterk afhankelijk van de afvoer in de periode voorafgaand aan dat tijdstip. Dit is duidelijk te zien in Figuur 3-3. De afvoer voorafgaand aan het tijdstip waarop de morfologische situatie van simulatie 1 is geplot, is lager dan de afvoer voorafgaand aan het tijdstip waarop de morfologische situatie van simulatie 2 is geplot. De morfologische veranderingen voor simulatie 2 vertonen meer fluctuaties door sterkere gradiënten in het snelheidsverloop dan de

veranderingen voor simulatie 1. Als gevolg hiervan is de morfologische situatie afhankelijk van het tijdstip waarop de afvoertijdreeks eindigt (Van Vuren et al., 2004).



*Figuur 3-3. zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen na een periode van 15 jaar in het hoogwater seizoen op het riviertraject de Bovenrijn en de Waal voor 2 model simulaties en de lopend-gemiddelde afvoer over een tijdschik van 3 maanden behorende bij deze 2 simulaties.*

Op basis van alle modelresultaten kan op elk tijdstip op elke locatie een cumulatieve kansverdeling van de morfologische verandering worden bepaald. Een voorbeeld van de cumulatieve kansverdeling op locatie km 907.4 in het hoogwater en laagwaterseizoen is gegeven in Figuur 3-4. Des te steiler het verloop van de cumulatieve kansverdeling des te kleiner de onzekerheid in de dwarsdoorsnede gemiddelde bodemverandering. Uit deze cumulatieve kansverdeling kunnen statistische karakteristieken, zoals de verwachtingswaarden en de 90%-betrouwbaarheidsband van de morfologische verandering worden bepaald. De grootte van deze betrouwbaarheidsband geeft de variatie aan van de morfologische reactie als gevolg van een stochastisch afvoerloop. Een smalle betrouwbaarheidsband duidt op weinig variatie en dus een kleine onzekerheid, een brede betrouwbaarheidsband betekent grote onzekerheid.



*Figuur 3-4. cumulatieve kansverdeling van de zomerbedgemiddelde bodemveranderingen op locatie km 907.4 in het hoogwater- en het laagwater seizoen.*

De ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen na een periode van 15 jaar in het hoog- en laagwater seizoen op het



riviertraject de Bovenrijn en de Waal enerzijds en de IJssel anderzijds zijn weergegeven in Figuur 3-5 en Figuur 3-7.

De ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken per riviertraject uit Tabel 1-1 zijn opgenomen in Bijlage 4. In deze Bijlage is ook weergegeven hoe de statistische karakteristieken convergeren met het aantal modelsimulaties. Hieruit blijkt dat de toegepaste 400 runs ruim voldoende zijn voor geconvergeerde uitkomsten.

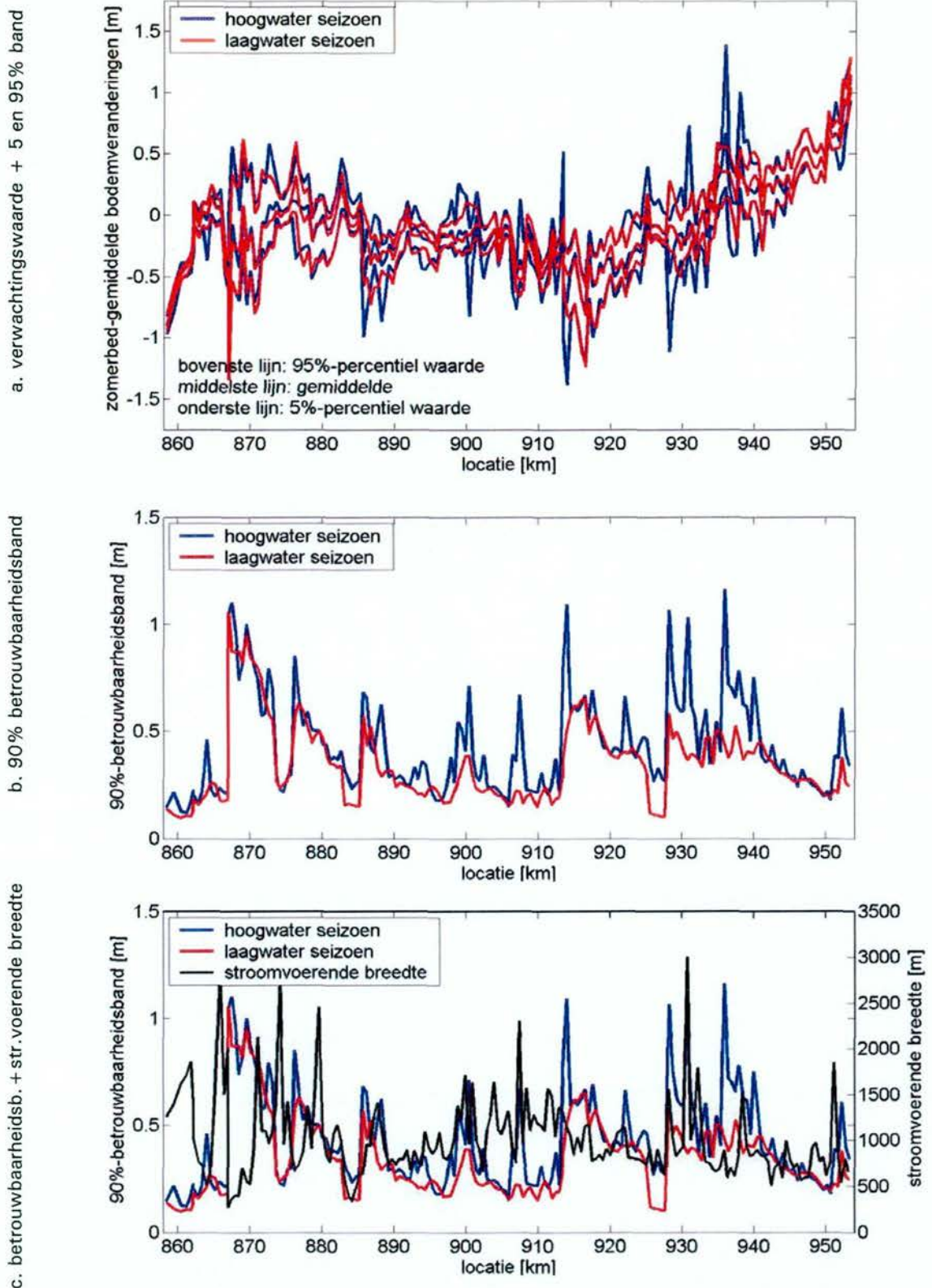
### **Bovenrijn en Waal**

In de afgelopen eeuw is erosie waargenomen op de Bovenrijn en Waal tot aan km 915. Vanaf km 915 vond aanzanding plaats. De erosie op het bovenstroomse traject en de aanzanding op het benedenstroomse traject zorgden samen voor een bodemkanteling en de afname van het bodemverhang. De berekeningen met het Rijntakkenmodel tonen een toekomstige morfologische ontwikkeling die overeenkomt met deze waargenomen ontwikkeling uit het verleden. De verwachtingswaarde van de zomerbed-gemiddelde bodemverandering in Figuur 3-5 laat zien dat over een periode van 15 jaar gemiddeld genomen de bodem tot aan km 930 verder erodeert en vanaf km 930 aanzandt. De figuur toont bovendien dat als gevolg van een onzeker afvoerverloop in combinatie met variaties in riviergeometrie, zoals uiterwaardbreedte variaties en menselijke ingrepen, de morfologische verandering onzeker is. Op locaties met grote variaties in riviergeometrie is de bodemvariabiliteit groot hetgeen tot uitdrukking komt in een ruime betrouwbaarheidsband. De breedte van de betrouwbaarheidsband varieert aanzienlijk per rivierlocatie, door:

1. De effecten van eerdere menselijke ingrepen: Op de Waal resulteren de bodemkribben in de buitenbocht bij Erlecom (km 873-876), de vaste laag in de buitenbocht bij Nijmegen (km 882-885) en de vaste laag in de buitenbocht bij St. Andries (km 925-928) in een smalle betrouwbaarheidsband ter plaatse, omdat ze de erosie beperken. Benedenstrooms van de rivierbochten met de bodemconstructies is er veel variatie door de erosie die optreedt bij hoge afvoeren. Dit leidt daar tot een brede betrouwbaarheidsband.
2. De variatie in stroomvoerende breedte: Een overgang van een kleine naar een grote uiterwaardbreedte leidt bij hoge afvoeren tot aanzanding, wat een grotere variatie in de uitkomsten tot gevolg heeft. De overgang van een grote uiterwaardbreedte naar een kleine heeft een tegenovergesteld effect: de vorming van erosiekuilen. Door de variërende afvoer vormen zich telkens nieuwe bodemgolven, die zich stroomafwaarts voortplanten. Op de Waal bevinden zich tussen km 900 en km 940 locaties met een sterke variatie in uiterwaardbreedte, zoals de Hiensche Waarden en Afferdensche Waarden (km 989-901), de Ochtense Buitenpolder (km 902-906), de Willemspolder en Drutense Waard (km 906-913), de Dreumelsche Waard (km 918-921), de Heesseltsche en Hurwenensche (km 924-932) en de Gamerensche en Crobsche waard (km 936-941). Deze locaties worden gekenmerkt door een brede betrouwbaarheidsband. De stroomvoerende breedte is per locatie weergegeven in Figuur 3-5c.
3. Het splitsingspunt Pannerdense Kop (km 867): De afvoerverdeling en sedimentverdeling op splitsingspunten is afhankelijk van de lokale morfologische situatie, welke sterk varieert. Dit wordt geïllustreerd door een brede betrouwbaarheidsband.

In het hoogwater seizoen is de ruimtelijke variatie in bodemvariabiliteit groter dan in het laagwater seizoen. In Figuur 3-5 wordt dit duidelijk geïllustreerd door een bredere betrouwbaarheidsband in het hoogwater seizoen dan in het laagwater seizoen. De tijdsafhankelijke variatie in de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen is voor twee locaties in meer detail onderzocht: (1) een locatie met een grote variatie in riviergeometrie (km 907.4) en (2) een locatie met een min of meer prismatische riviersectie (km 895.3). De resultaten in Figuur 3-6 vertonen voor de locatie met een grote variatie in riviergeometrie een aanzienlijke seizoensafhankelijkheid in de statistische karakteristieken: de grootste onzekerheid in bodemvariatie wordt voorspeld voor het hoogwater seizoen; de kleinste onzekerheid in het laagwater seizoen.

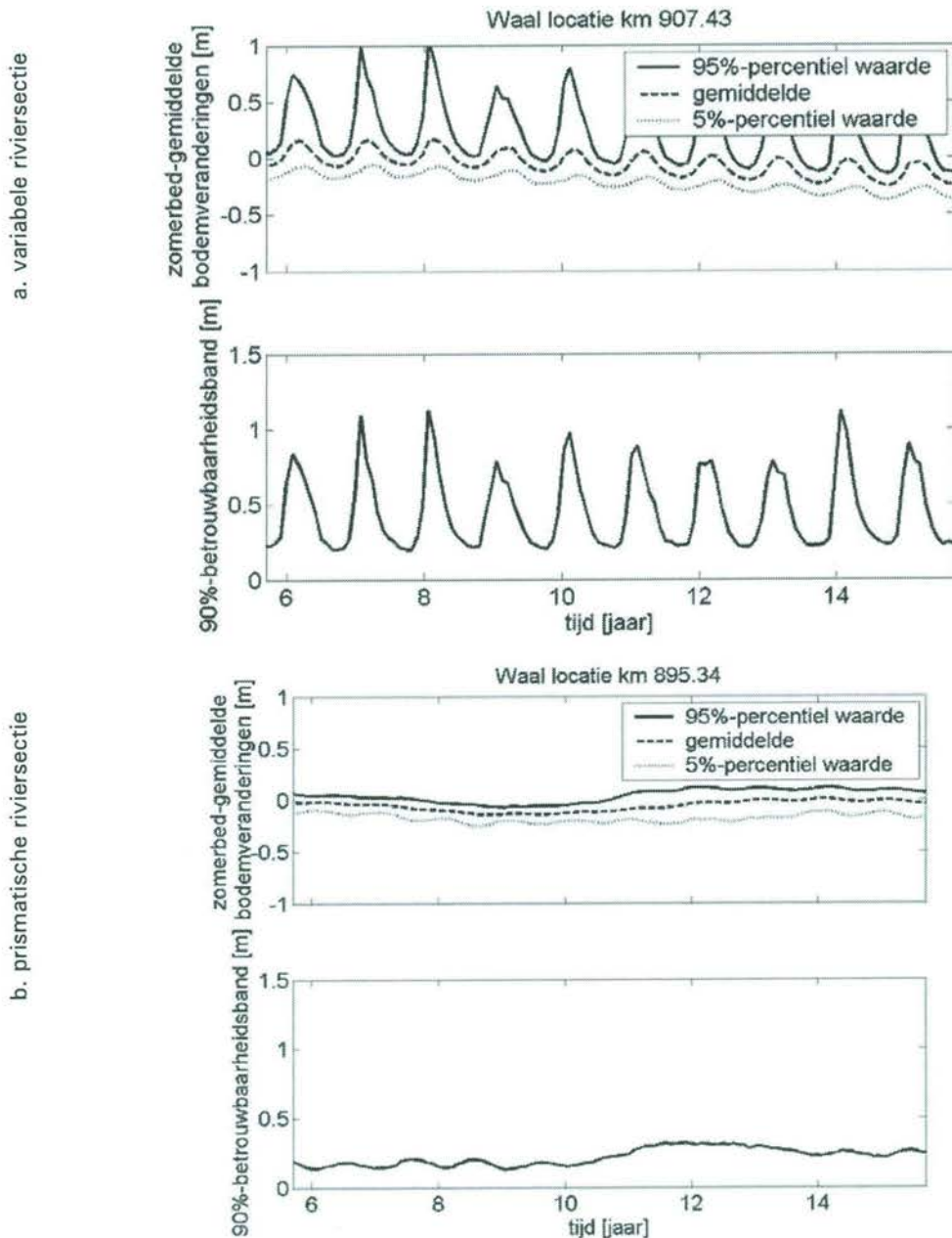




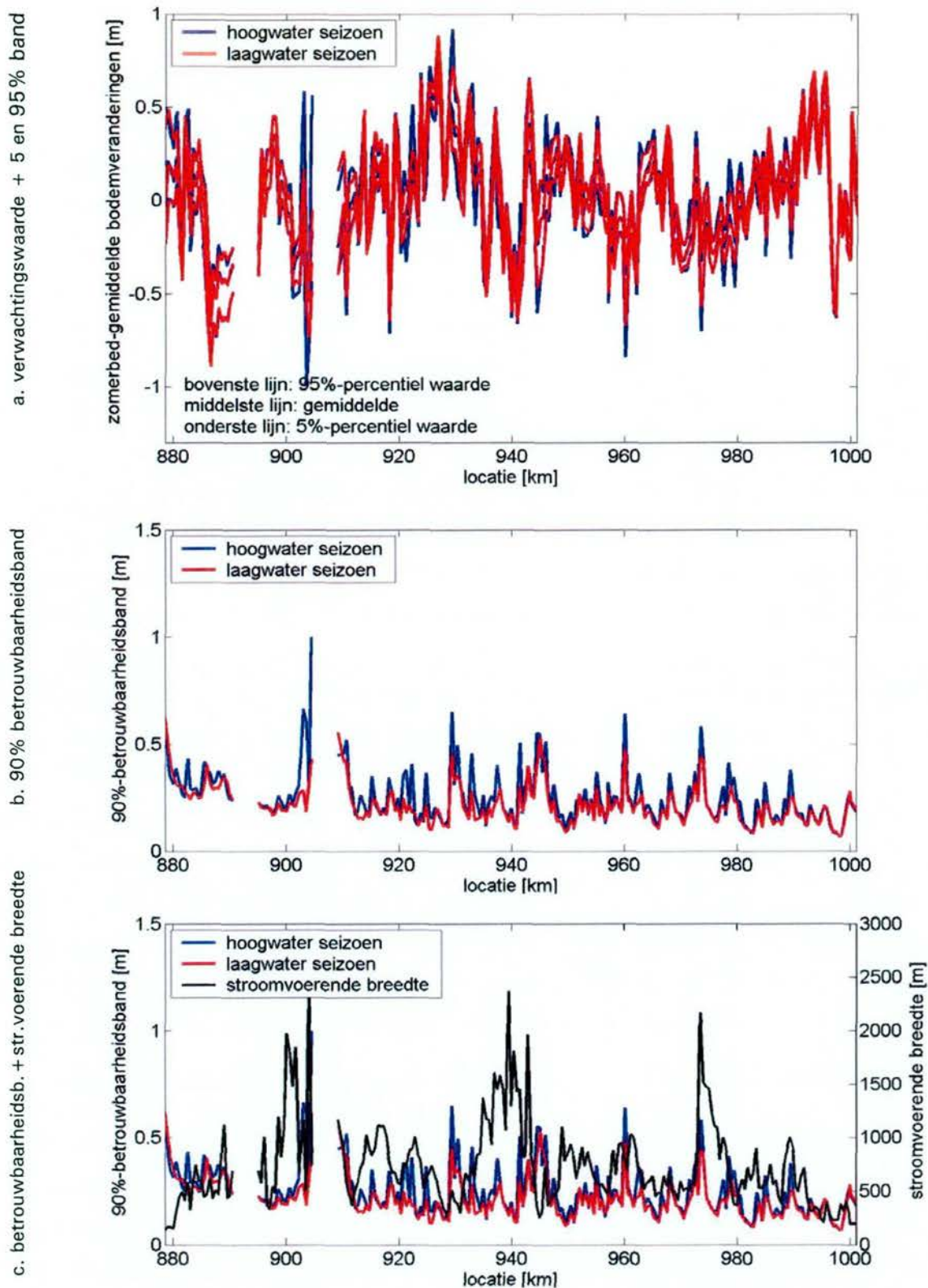
Figuur 3-5. ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen na een periode van 15 jaar in het hoog- en laagwater seizoen op het riviertraject de Bovenrijn en de Waal (a) verwachtingswaarden en 95%- en 5%-percentiel waarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) betrouwbaarheidsband samen met variatie in stroomvoerende uiterwaardsbreedte.



Ter plaatse van km 907.4 (de overgang van een smalle naar een brede uiterwaard) wordt aanzanding in de hoofdgeul voorspeld. De 95%-percentielwaarde oscilleert sterk. Deze oscillatie is minder sterk voor de 5%-percentielwaarde. Dit kan worden verklaard door het feit dat tijdens afvoeren groter dan de 'bankfull'-afvoer bodemgolven worden opgewekt in de hoofdgeul. Deze bodemgolven verplaatsen zich in benedenstroomse richting en dempen (gedeeltelijk) uit tijdens afvoeren lager dan de 'bankfull'-afvoer, wanneer de afvoer in de hoofdgeul blijft. Als gevolg hiervan is de seizoenfluctuatie in de 5%-percentielwaarde beperkt. Op locatie km 895 in een uniform riviergedeelte is de seizoenfluctuatie beperkt. De onzekerheid in zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen op deze locatie wordt natuurlijk wel beïnvloed door bodemgolven die op bovenstroomse locaties zijn opgewekt en zich in benedenstroomse richting verplaatsen totdat ze locatie km 895 passeren.



Figuur 3-6. tijdsafhankelijke variatie van de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen gedurende een periode van 10 jaar (1 oktober 2002 - 30 september 2012) voor (a) een rivierlocatie met een grote variatie in riviergeometrie (km 907.4); (b) een rivierlocatie met een min of meer prismatische riviersectie (km 895.3).



Figuur 3-7. ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen na een periode van 15 jaar in het hoog- en laagwater seizoen op het riviertraject de IJssel (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) betrouwbaarheidsband samen met variatie in stroomvoerende uiterwaardsbreedte.



## IJssel

In de afgelopen eeuw is een afwisselend patroon van geringe erosie en aanzanding waargenomen op de IJssel. Tot 1970 was de bodemligging min of meer stabiel. Door een toename van het baggerwerk (netto sedimentonttrekking) is de bodem vanaf 1970 gaan dalen. Vanaf 1990 is er niet of nauwelijks meer gebaggerd in de IJssel en is de bodemligging redelijk stabiel. Dit betekent echter niet dat er geen scheepvaartproblemen zijn op de IJssel die vragen om baggerwerk.

De berekeningen met het Rijntakkenmodel tonen een toekomstig beeld dat overeenkomt met deze waargenomen ontwikkeling uit het verleden. De verwachtingswaarde van de zomerbed-gemiddelde bodemverandering in Figuur 3-7 laat over een periode van 15 jaar geen gemiddelde erosie of sedimentatie zien. Figuur 3-7 geeft de variatie in stroomvoerende breedte per rivierlocatie weer. Op locaties met grote variaties in riviergeometrie neemt de bodemvariabiliteit toe en wordt een toename van de betrouwbaarheidsband waargenomen. Dit beeld komt overeen met de voorspellingen op de Bovenrijn en de Waal.

Als we Figuur 3-5b met Figuur 3-7b vergelijken, dan zien we dat de onzekerheid in bodemvariabiliteit en de mate van seizoensafhankelijkheid van deze onzekerheid groter is voor de Bovenrijn en Waal dan voor de IJssel. Ruimtelijke gradiënten in de sedimentflux veroorzaken morfologische veranderingen. De snelheid waarmee deze morfologische veranderingen voortplanten en dempen wordt bepaald door de morfologische tijdschaal, welke voor de verschillende Rijntakken kan worden afgeleid met de volgende formules (De Vries, 1975):

$$T_1 = \frac{L}{c} = \frac{L \cdot (1 - \varepsilon_s) \cdot h}{b \cdot s} \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{L^2}{K} = \frac{L^2 \cdot 3 \cdot i_b}{b \cdot s}$$

met  $T_1$  de morfologische tijdschaal die gerelateerd is aan de voortplanting van morfologische verstoringen en  $T_2$  de morfologische tijdschaal die gerelateerd is aan de demping en spreiding van de morfologische verstoringen.  $c$  is de karakteristieke voortplantingssnelheid van morfologische verstoringen,  $K$  de diffusiecoëfficiënt,  $L$  de lengteschaal,  $b$  de exponent in de transportformule,  $s$  sedimenttransport per eenheid van breedte,  $h$  de waterdiepte,  $\varepsilon_s$  porositeitcoëfficiënt en  $i_b$  het bodemverhang. De morfologische tijdschaal is voor de IJssel veel groter dan voor de Bovenrijn en Waal. De morfologische processen verlopen daardoor trager, wat resulteert in kleinere bandbreedtes voor de bodemveranderingen op de IJssel.

### 3.3.2 Ruimtelijk basisalternatief

De verschillen in stochastisch morfologisch gedrag tussen de uitgangssituatie en het ruimtelijk basisalternatief zijn weergegeven in Figuur 3-8 (Bovenrijn en Waal) en Figuur 3-9 (IJssel). Voor een gedetailleerd beeld wordt verwezen naar de stochastische resultaten per riviertraject in Bijlage 4.

#### Bovenrijn en Waal

Voor het ruimtelijke basisalternatief komt de verwachtingswaarde van de rivierbodemligging op de Waal over het traject direct na de vaste laag bij Nijmegen (km 885 - 890), het traject tussen km 902-906 (Ochtense Buitenpolder) en het traject tussen km 924 - 933 (Heesseltsche en Hurwenensche Waarden) hoger te liggen (zie Figuur 3-8b). Over het grootste deel van de Waal neemt de onzekerheid in bodemligging toe (zie Figuur 3-8c en d). Figuur 3-8c geeft inzicht in de absolute verandering in de onzekerheidsband. Figuur 3-8d laat de relatieve veranderingen zien in procenten ten opzichte van de uitgangssituatie. De toename is het grootst op het traject tussen km 885-898 (verdubbeld) en benedenstrooms van km 924 (lokaal een verdrievoudiging van de onzekerheidsband). Op de Waal worden vanaf het splitsingspunt (km 876) tot aan Woudrichem (km 953) een groot aantal rivierverruimende maatregel voorgesteld (zie Bijlage 1), zoals het verlagen van uiterwaarden en de aanleg van nevengeulen. Ter plaatse van Nijmegen (km 883 - 885) wordt grootschalige



uiterwaardverbreding gerealiseerd door het landinwaarts verleggen van de rivierdijk. Op de trajecten km 885-891, km 902-907, km 911-917, km 937- 946 worden naast ruimtelijke maatregelen ook zomerkades verlaagd en/of verwijderd. Deze maatregelen resulteren in een frequenter en/of intensiever overstromen van de uiterwaarden. Als gevolg hiervan komt de bodem hoger te liggen en neemt de grootte van het betrouwbaarheidsinterval toe. Dit laatste effect wordt met name waargenomen op riviertrajecten waarin de riviergeometrie en daarmee de afvoerverdeling over het zomer- en winterbed door de maatregelen sterker varieert.

### **IJssel**

Voor het bovenstroomse deel van de IJssel tot aan km 905 is het niet noodzakelijk rivierverruimende maatregelen te treffen aangezien op dit traject de dijken aan weerskanten van de rivier al voldoende hoog en sterk zijn. Op dit traject zijn dan ook geen significante verschillen tussen de stochastische resultaten van het ruimtelijke basisalternatief en de uitgangssituatie voorspeld (zie Figuur 3-9). Vanaf km 905 worden rivierverruimende maatregelen toegepast. Op het traject km 975-1000 wordt een zomerbedverdieping van 1 m toegepast. Door middel van een continue sedimentonttrekking ter plaatse van km 975 wordt het verdiepte zomerbed op diepte gehouden.

De maatregelen zorgen voor een afwisselende toename en afname van de afvoer door de hoofdgeul. Dit resulteert in een toename van de verwachtingwaarde van de bodemligging op de trajecten tussen km 950-956, km 978-984 en km 992-995 en in een daling van de verwachtingwaarde van de bodemligging op de trajecten tussen km 956-963, km 970-977 en km 995-998 (zie Figuur 3-9a en b). De bodemvariabiliteit neemt toe op het traject km 950-977 en km 994-998. Door de zomerbedverdieping in combinatie met de constante sedimentonttrekking neemt ter plaatse van km 975 de bodemvariabiliteit toe. Dit komt omdat de sedimentonttrekking constant in de tijd is en niet afhankelijk is van de afvoer. Er zijn momenten waarop de sedimentonttrekking respectievelijk te groot en te klein is om de bodem op evenwicht te houden waardoor een extra diepte of ondiepte ontstaat. Dit zien we terug in een vergrote bodemvariabiliteit. In het traject benedenstrooms van km 975 is de bodemligging min of meer constant en neemt de bodemvariabiliteit ten opzichte van de uitgangssituatie af.

### **3.3.3 Budget basisalternatief**

De verschillen in stochastisch morfologisch gedrag tussen de uitgangssituatie en het budget basisalternatief zijn weergegeven in Figuur 3-8 (Bovenrijn en Waal) en Figuur 3-9 (IJssel). Voor een gedetailleerd beeld wordt verwezen naar de stochastische resultaten per riviertraject in Bijlage 4.

In het budgetalternatief ligt het accent van de RvdR-maatregelen minder op de ruimtelijke oplossingen. Het budgetalternatief bestaat uit een mix van een groot aantal technische maatregelen, waaronder dijkversterking. Daarnaast is ook een aantal ruimtelijke maatregelen opgenomen. Dit betreft met name ruimtelijke maatregelen die zijn opgenomen in recent uitgevoerde en lopende projecten.

#### **Bovenrijn en Waal**

Op de Waal is bovendien kribverlaging toegepast op het traject Midden-Waal (km 887-915), de omgeving van St. Andries (km 915-934) en de Beneden-Waal (km 934-953). De morfologische effecten van het budgetalternatief op de Waal zijn beperkt (zie Figuur 3-8). Benedenstrooms van km 900 is een lichte toename in de bodemvariabiliteit voorspeld.

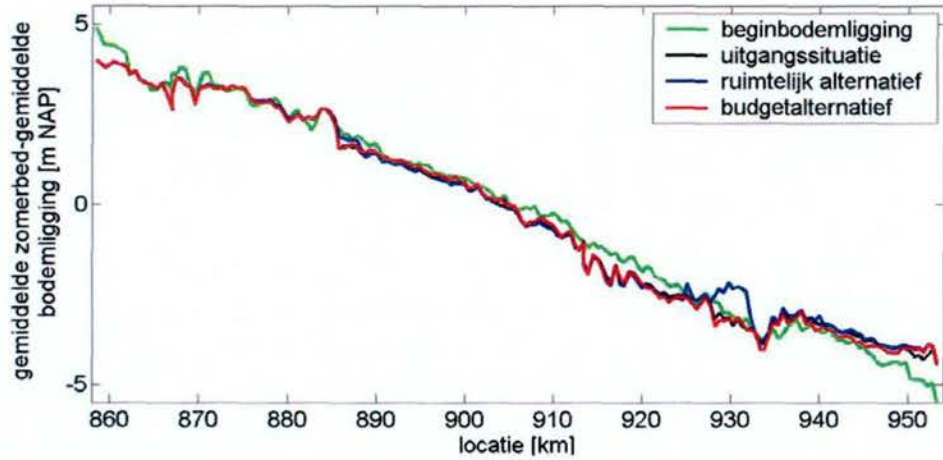
#### **IJssel**

Naast lopende projecten met ruimtelijke maatregelen in het traject km 950-994 worden op de IJssel op het traject km 904-915 ruimtelijke maatregelen in de vorm van het verlagen van zomerkades, het doorlatend maken van een veendam en uiterwaardverlaging voorgesteld. Bovendien wordt net als in het ruimtelijk basisalternatief het zomerbed over het traject km 975-1000 met 1 m verlaagd. De morfologische effecten (zie Figuur 3-9) zijn vergelijkbaar met de morfologische effecten die voor het ruimtelijk basisalternatief zijn voorspeld. Door de verlaging van zomerkades ter plaatse van het traject km 904-915 in combinatie met

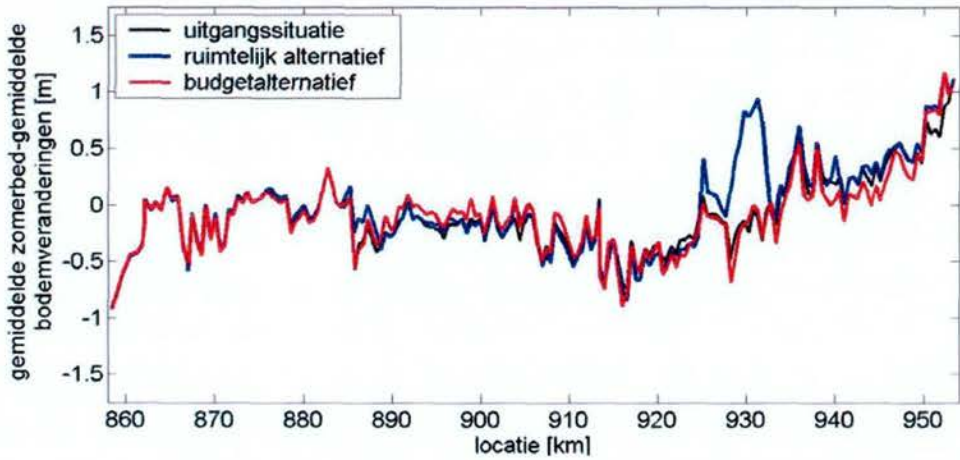


uiterwaardverlaging, overstroomden de uiterwaarden frequenter en/of intensiever. Dit leidt tot een toename in de onzekerheid van de bodemvariabiliteit. Door de zomerbedverdieping in combinatie met de constante sedimentonttrekking neemt ook in het budgetalternatief ter plaatse van km 975 de bodemvariabiliteit toe.

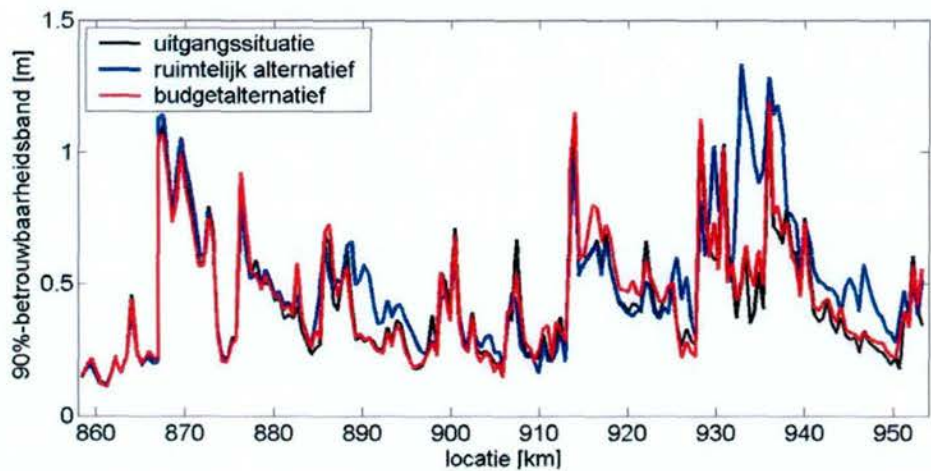
a. verwachtingswaarde bodem

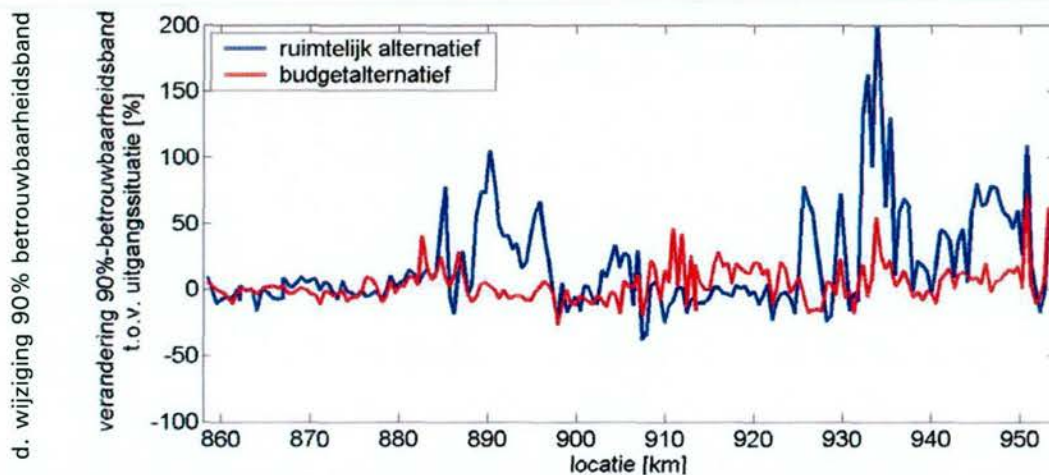


b. verwachte bodemverandering

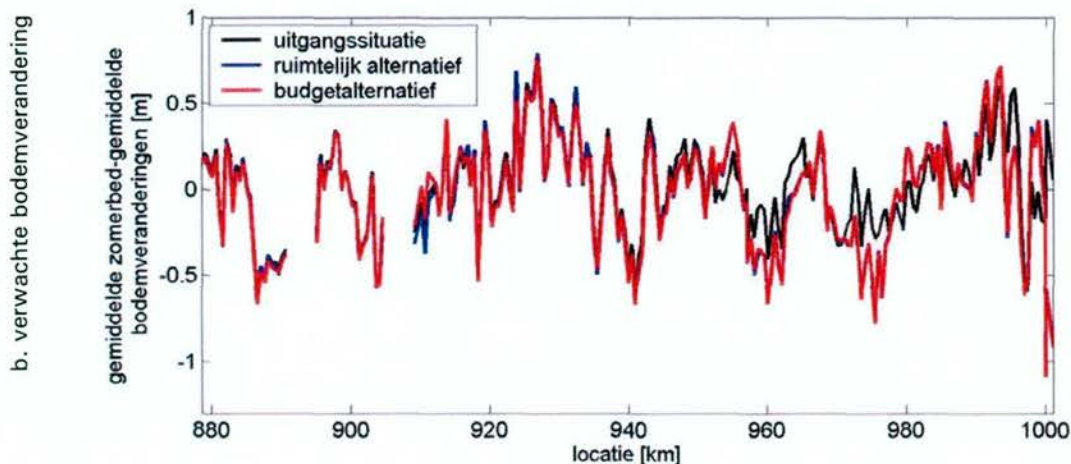
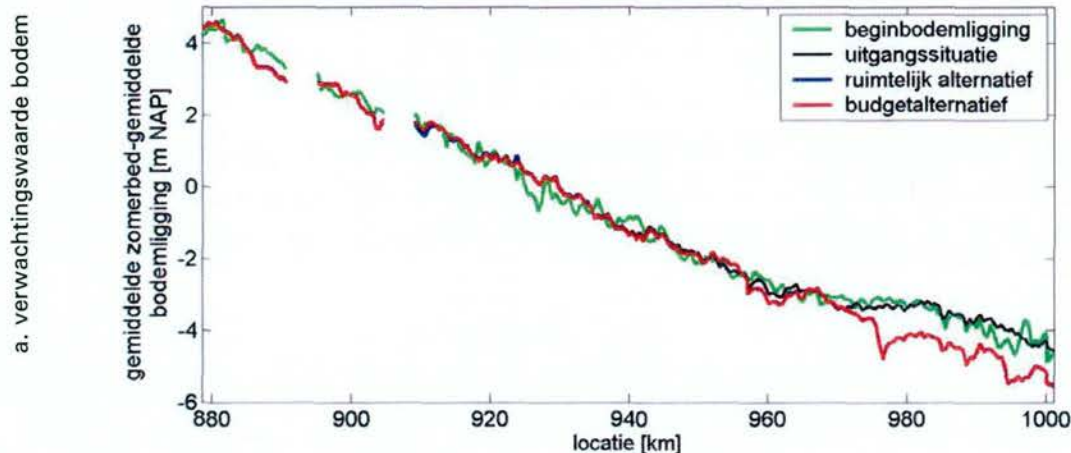


c. 90% betrouwbaarheidsbanden

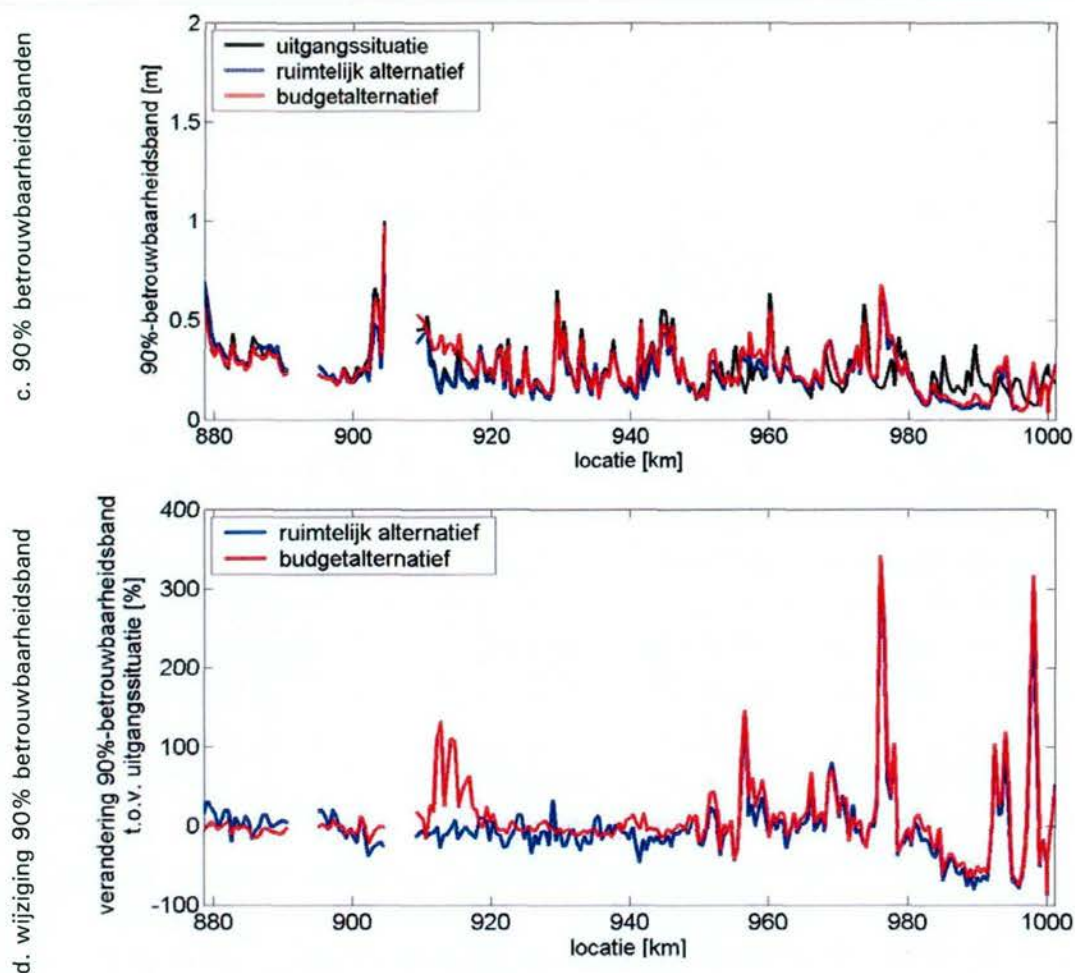




Figuur 3-8. ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken van de morfologische ontwikkeling na een periode van 15 jaar in het hoogwater seizoen op de Bovenrijn en de Waal: (a) verwachtingwaarden bodemligging; (b) verwachtingwaarden bodemverandering en (c) 90%-betrouwbaarheidsband van de bodemveranderingen voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven; (d) verandering van 90%-betrouwbaarheidsband voor de basisalternatieven t.o.v. de uitgangssituatie.







Figuur 3-9. ruimtelijke variatie van de statistische karakteristieken van de zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen na een periode van 15 jaar in het hoogwater seizoen op de IJssel: (a) verwachtingwaarden bodemwijziging; (b) verwachtingwaarden bodemverandering en (c) 90%-betrouwbaarheidsband van de bodemveranderingen voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven; (d) verandering van 90%-betrouwbaarheidsband voor de basisalternatieven t.o.v. de uitgangssituatie.

### 3.4 Conclusies

De stochastische benadering bij het berekenen van de morfologische reactie in de uitgangssituatie en op de maatregelen voor rivierverruiming in de basisalternatieven verschaft inzicht in de variatie en onzekerheid van deze reactie. Niet alleen wordt duidelijk dat er veel verschillende morfologische reacties mogelijk zijn, maar ook op welke locaties de grootste onzekerheid in de uitkomst te verwachten is. De rivierverruimende maatregelen kunnen lokaal leiden tot grote sedimentatie en erosiepatronen en een versterkte bodemvariatie. Als gevolg hiervan kunnen sommige locaties zich ontwikkelen tot mogelijke nautische knelpunten in de rivier. Bovendien kunnen zij leiden tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk in de rivier. Dit resulteert in hogere onderhoudskosten en tot meer overlast voor de scheepvaart. Inzicht in mogelijke knelpunten, kritieke perioden en verwachte baggerhoeveelheden is van belang bij de afweging tussen verschillende basisalternatieven. Dit is onderwerp van onderzoek in de Hoofdstukken 4 en 5.



## 4 Bevaarbaarheid Rijntakken zonder onderhoudsbaggerwerk

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de bevaarbaarheid van de Bovenrijn, de Waal en de IJssel voor de uitgangssituatie in Paragraaf 4.2 en de RvdR-alternatieven in Paragraaf 4.3 onderzocht. Voor al deze drie situaties geldt voornamelijk dat geen onderhoudsbaggerwerk is beschouwd. Voor de uitgangssituatie en de RvdR-alternatieven zijn gedurende een periode van 10 jaar (1 oktober 2002 - 30 september 2012) voor elke vijf dagen de zomerbed-gemiddelde waterdiepte per rivierlocatie voor 400 modelsimulaties met het SOBEK-Rijntakkenmodel berekend. Deze zomerbed-gemiddelde waterdiepten zijn vertaald naar minimale representatieve waterdiepten in de vaargeul van de dwarsdoorsnede. Vervolgens is voor elke tijdstap van vijf dagen voor alle locaties achteraf vastgesteld of de rivier bevaarbaar was bij een vaardiepte variërend tussen 1,5 en 5 m. Met een statistische nabewerking van alle modelresultaten kunnen de statistische karakteristieken van:

- het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie over een periode van 10 jaar;
- het bevaarbaarheidspercentage per riviertraject (van Tabel 1-1) over een periode van 10 jaar (hiervoor is per tijdstap van vijf dagen de minimale waterdiepte in het traject bepaald);

als functie van de vaarbandiepte worden bepaald. Zo kunnen de locaties met de grootste scheepvaartbeperkingen worden vastgesteld.

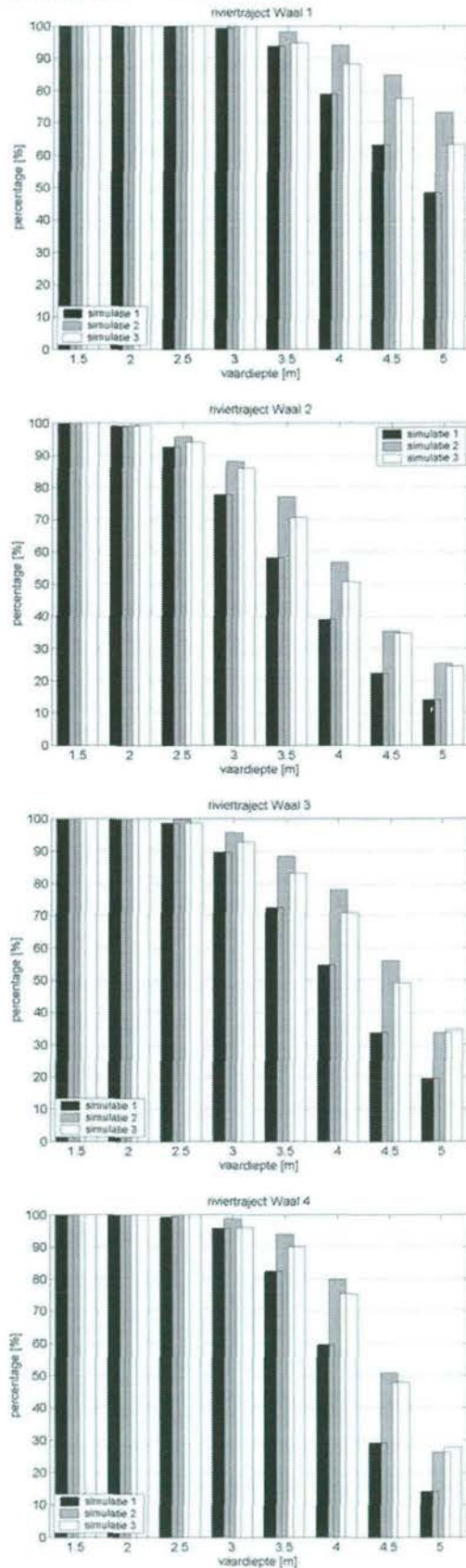
### 4.2 Uitgangssituatie

Zoals gezegd zijn 400 modelsimulaties uitgevoerd met het Rijntakkenmodel. Voor elke simulatie is random een afvoerverloop gegenereerd, wat resulteert in een mogelijke toekomstige ontwikkeling van de rivier. Figuur 4-1a en Figuur 4-2a laten zien dat het bevaarbaarheidspercentage in de periode van 10 jaar tussen 1 oktober 2002 en 30 september 2012 verschilt per afvoertijdreeks. De statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per riviertraject zijn voor een vaardiepte variërend van 1,5 tot 5 m op basis van alle modelresultaten bepaald (Figuur 4-1b en Figuur 4-2b). Uit deze resultaten kan worden afgeleid dat het gemiddelde bevaarbaarheidspercentage voor bijvoorbeeld het riviertraject Waal 2 bij een diepgang van 3 m, gemiddeld over een periode van 10 jaar, 84,8% is. De figuren laten ook zien dat er een kans van 90% is dat dit percentage tussen de 77,5% en 90,1% ligt. Het minimale en maximale bevaarbaarheidspercentage in dit traject is 70,9% en 94,3%.

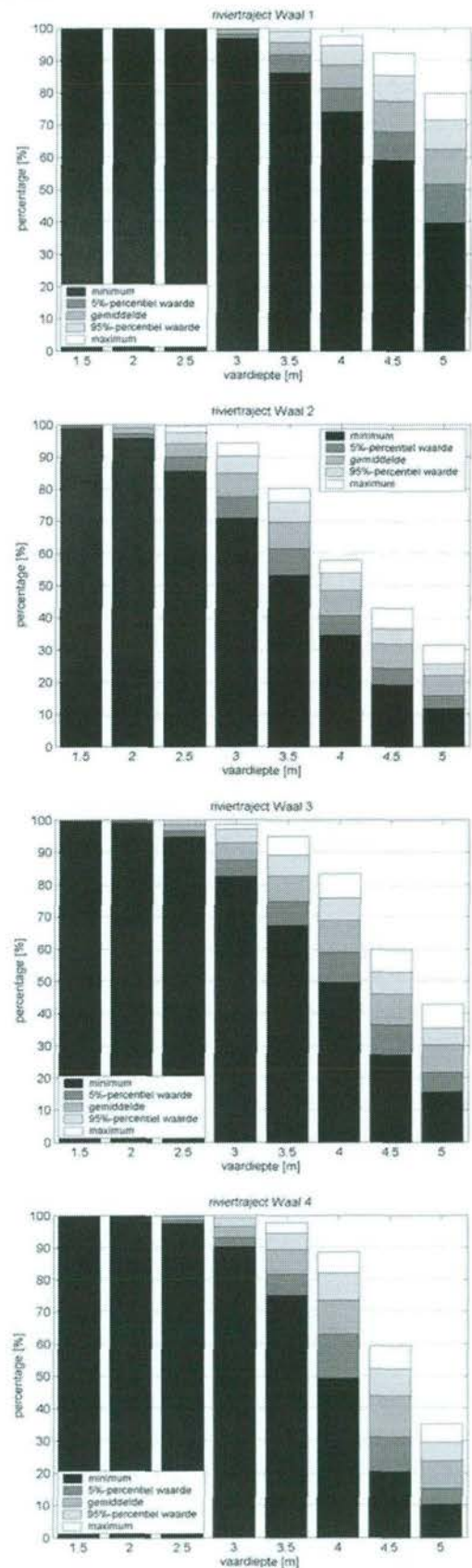
Uit de resultaten per riviertraject (Figuur 4-1 en Figuur 4-2) kan worden geconcludeerd dat de Bovenrijn (Waal 1) het best bevaarbare traject is. De Waal tussen km 867 en km 887 (Waal 2) is het slechtst bevaarbare traject op de Waal. Dit is het gevolg van de grote bodemvariaties ter plaatse van het splitsingspunt en de scherpe rivierbochten direct benedenstrooms van het splitsingspunt. De correctie op de zomerbedgemiddelde waterdiepte is het grootste op rivierlocaties met scherpe rivierbochten (zie Figuur 2-5). Op een aantal rivierbochten met de kleine bochtstraal - Erlecom, Nijmegen en St. Andries - zijn ten behoeve van de scheepvaart bodemconstructies aangebracht. Voor deze bochten is daarom geen waterdiepte-correctie toegepast (zie ook paragraaf 2.4.2). De Midden-Waal (tussen Nijmegen en St. Andries - Waal 3) en het traject benedenstrooms van St. Andries (Waal 4) zijn goed bevaarbaar. De rivierbochten op dit traject zijn minder scherp dan op het bovenstroomse Waaltraject km 867-887.



a. 3 modelruns

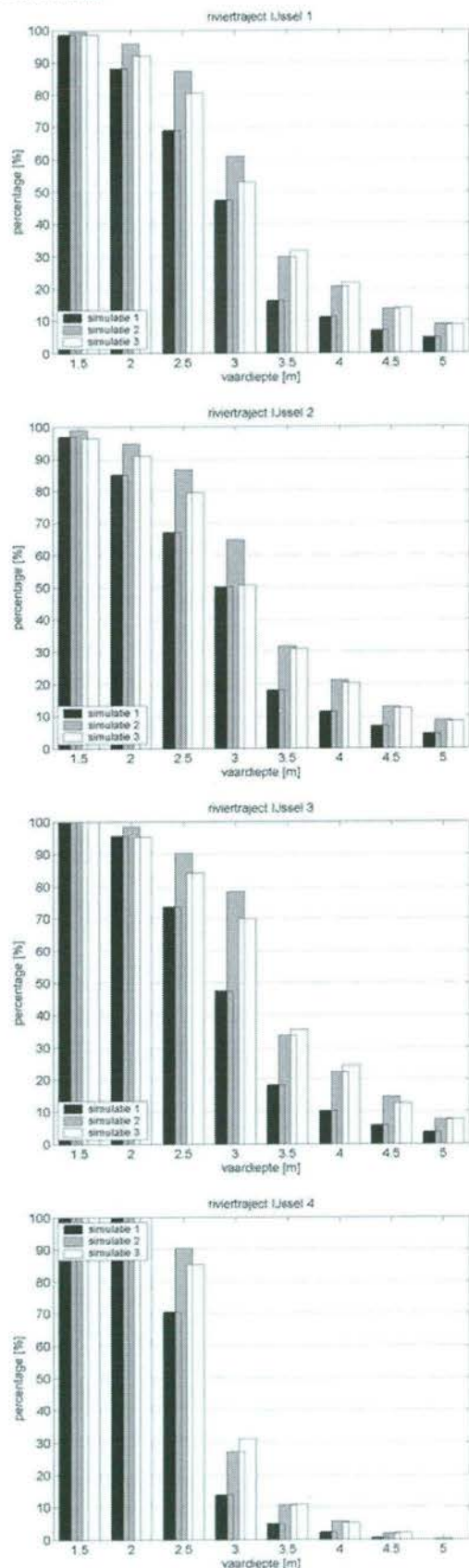


b. alle runs

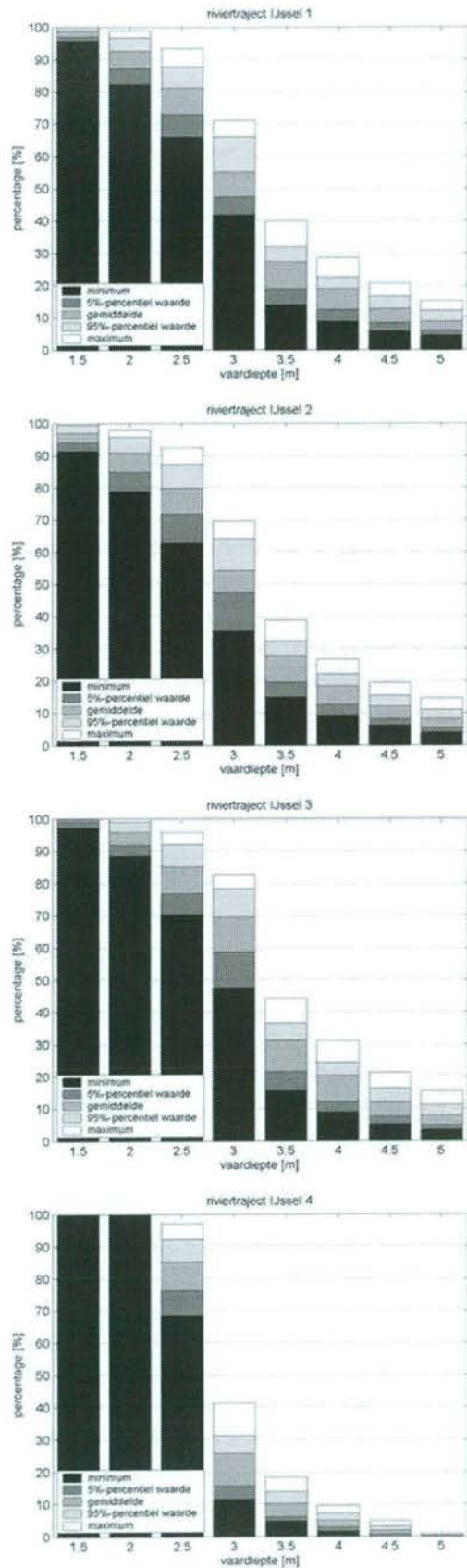


Figuur 4-1. bevaarbaarheidspercentages per riviertraject als functie van de vaardiepte op riviertrajecten van de Bovenrijn en Waal in de periode 2003-2012: (a) percentage voor 3 afzonderlijke modelruns (b) statistische karakteristieken van het percentage voor alle modelsimulaties.

a. 3 modelruns



b. alle runs



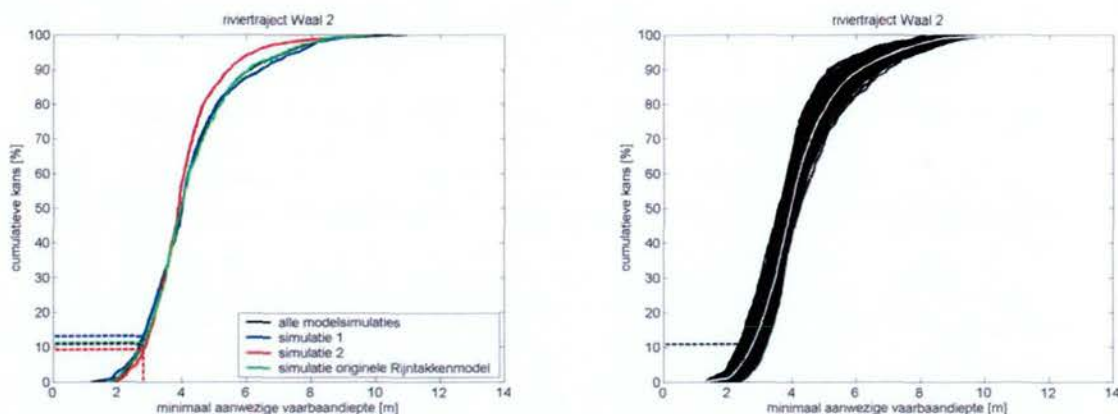
Figuur 4-2. bevaarbaarheidspercentages per riviertraject als functie van de vaardiepte op riviertrajecten van de IJssel in de periode 2003-2012: (a) percentage voor 3 afzonderlijke modelruns (b) statistische karakteristieken van het percentage voor alle modelsimulaties.



Diepte- en breedteafmetingen van de scherpe rivierbochten in de relatief kleine IJssel, leveren beperkingen op voor de scheepvaart. In de afgelopen decade is de IJssel niet meegegroeid met de enorme schaalvergroting die in de scheepvaartsector heeft plaatsgevonden. Dit leidt onder andere tot problemen in de rivierbochten. IJsseltraject 4 is het best bevaarbare traject voor een vaardiepte kleiner dan 2,5 m. Bij dezelfde diepgang zijn de bovenstroomse trajecten tot aan km 950 (IJssel 1 en 2) de slechtst bevaarbare trajecten (zie Figuur 4-2). Bij vaardiepten groter dan 2,5 m is het meest benedenstrooms gelegen traject (km 971-1001, IJssel 4) het minst goed bevaarbaar. Bij 2,5 m vaardiepte is de bevaarbaarheid op de vier IJsseltrajecten vergelijkbaar.

Figuur 4-1 en Figuur 4-2 geven inzicht in de bevaarbaarheid bij een vaardiepte variërend tussen 1,5 en 5 m. Volgens het Tweede Structuurschema Verkeer en Vervoer (SVV 2) en het Nationaal Verkeer en Vervoerplan (NVVP) geldt dat de Nederlandse Rijntakken tijdens een afvoer groter dan de OLA ( $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ ) te allen tijde bevaarbaar moet zijn voor de vereiste scheepsklasse met eisen ten aanzien van vaarbaandiepte en breedte zoals deze gespecificeerd zijn in Tabel 2-1. De OLA wordt gemiddeld 5% per jaar onderschreden. Zowel voor de rivierbeheerder als het scheepvaartverkeer is inzicht in de kans dat bij een afvoer groter dan de OLA niet aan deze scheepvaartseisen wordt voldaan van belang. Deze kans kan dienen als een beoordelingscriterium dat een indicatie is voor de kwaliteit van het rivierbeheer.

In Figuur 4-3a is de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte op Waaltraject 2 weergegeven voor 3 afzonderlijke simulaties en alle modelsimulaties samen. Elke afzonderlijke modelsimulatie leidt tot een kans op een representatieve waterdiepte kleiner dan 2,8 m. Deze kans varieert aanzienlijk per simulatie. Voor de afzonderlijke simulaties in Figuur 4-3a zijn deze kansen 13,2%, 11,3% en 9,2%. Voor de 400 afzonderlijke Monte Carlo simulaties varieert deze kans tussen de 3,4% en 22,1%, zie Figuur 4-3b. Voor het totaal aantal simulaties convergeert de cumulatieve kansverdeling naar de witte lijn in Figuur 4-3b. De kans op een waterdiepte kleiner dan 2,8 m is dan 10,9%.



Figuur 4-3. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte voor riviertraject Waal 2 voor (a) alle modelsimulaties en 3 afzonderlijke simulaties en (b) alle modelsimulaties afzonderlijk en alle samen genomen.

Figuur 4-4a en Figuur 4-5a geven de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte per traject over een periode van 10 jaar volgend uit de resultaten van alle modelsimulaties. Uit deze figuren kan zowel de kans als de conditionele kans, gegeven een afvoer groter dan OLA, op een waterdiepte kleiner dan 2,8 m (resp. 2,5 m voor de IJssel) worden afgeleid. Figuur 4-4 laat bijvoorbeeld zien dat op het traject Waal 3 de kans op een diepte kleiner dan 2,8 m gelijk is aan 4,4%. Dit komt redelijk overeen met de overschrijdingskans van de OLA van 5%. De kans op een diepte kleiner dan 2,8 m tijdens afvoeren groter dan OLA is echter nog steeds aanwezig, zij het dat deze kans erg klein is - 1,5%.



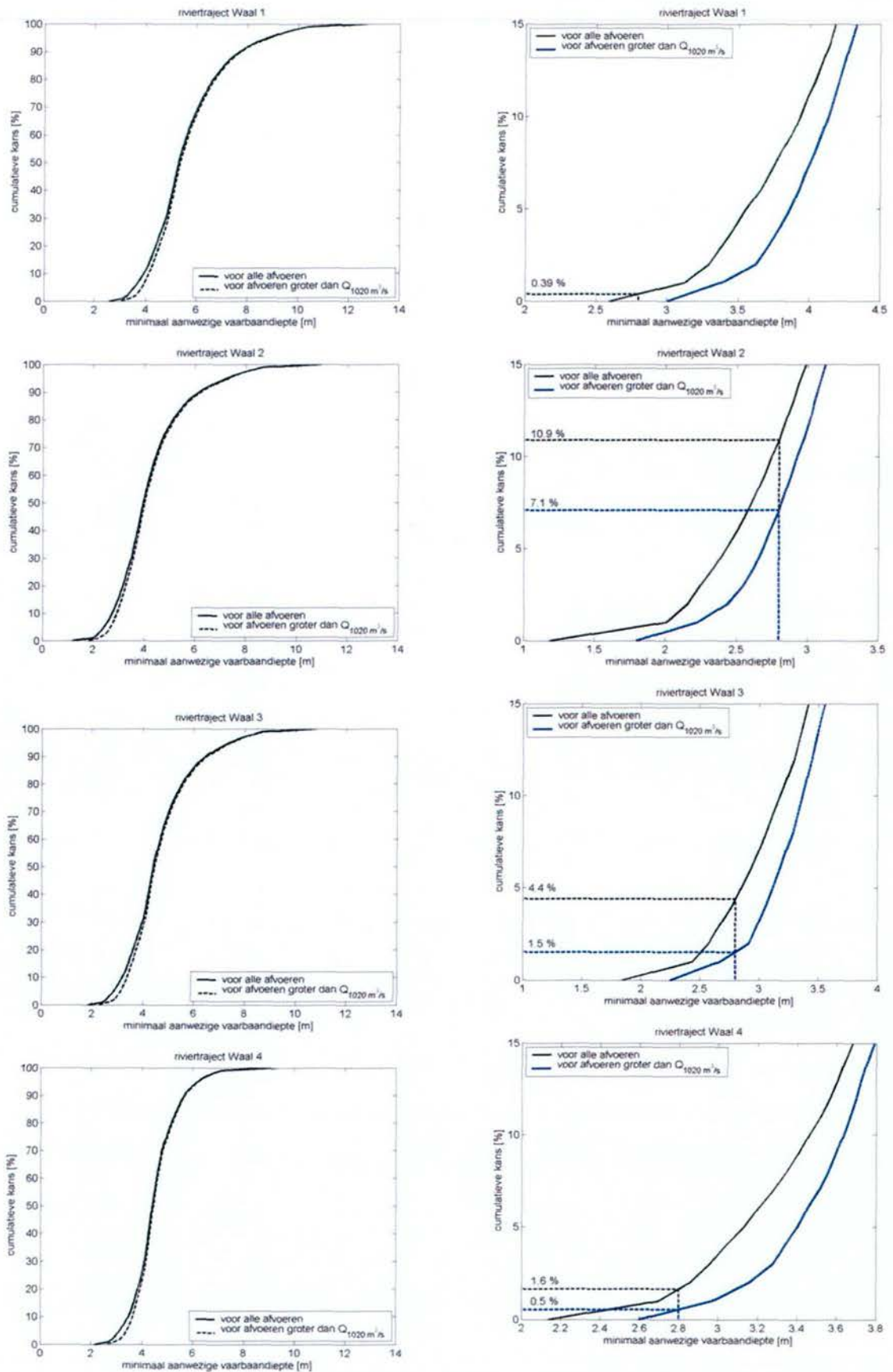
Met behulp van deze figuren kan voor elk riviertraject worden bepaald of aan de scheepvaart-eisen wordt voldaan. Op de Waal blijkt dat traject 2 niet aan de gestelde scheepvaart-eisen voldoet. De kans op een diepte kleiner dan 2,8 m is gelijk aan 10,9%. Tijdens afvoeren groter dan OLA is deze kans gelijk aan 7,1%. Voor Waaltrajecten 3 en 4 wordt net niet aan de OLA-eis voldaan. Op deze trajecten is de kans op een representatieve waterdiepte kleiner dan 2,8 m wel erg klein, namelijk 1,5% en 0,5%. Op Waaltraject 1 (de Bovenrijn) wordt zonder baggerinspanningen al aan de OLA-eis voldaan.

Voor de IJssel geldt dat op alle trajecten niet aan de gestelde OLA-eisen wordt voldaan. De bovenstroomse trajecten, IJssel 1 en IJssel 2, zijn het slechtst bevaarbaar. Dit komt onder andere door een aantal scherpe rivierbochten ter plaatse van km 886, 895, 910, 919 en 932. De kans op een waterdiepte kleiner dan 2,5 m bij een afvoer groter dan OLA op trajecten 1 en 2 is 15,5% en 16,5%. Op trajecten 3 en 4 is deze kans gelijk aan 11%.

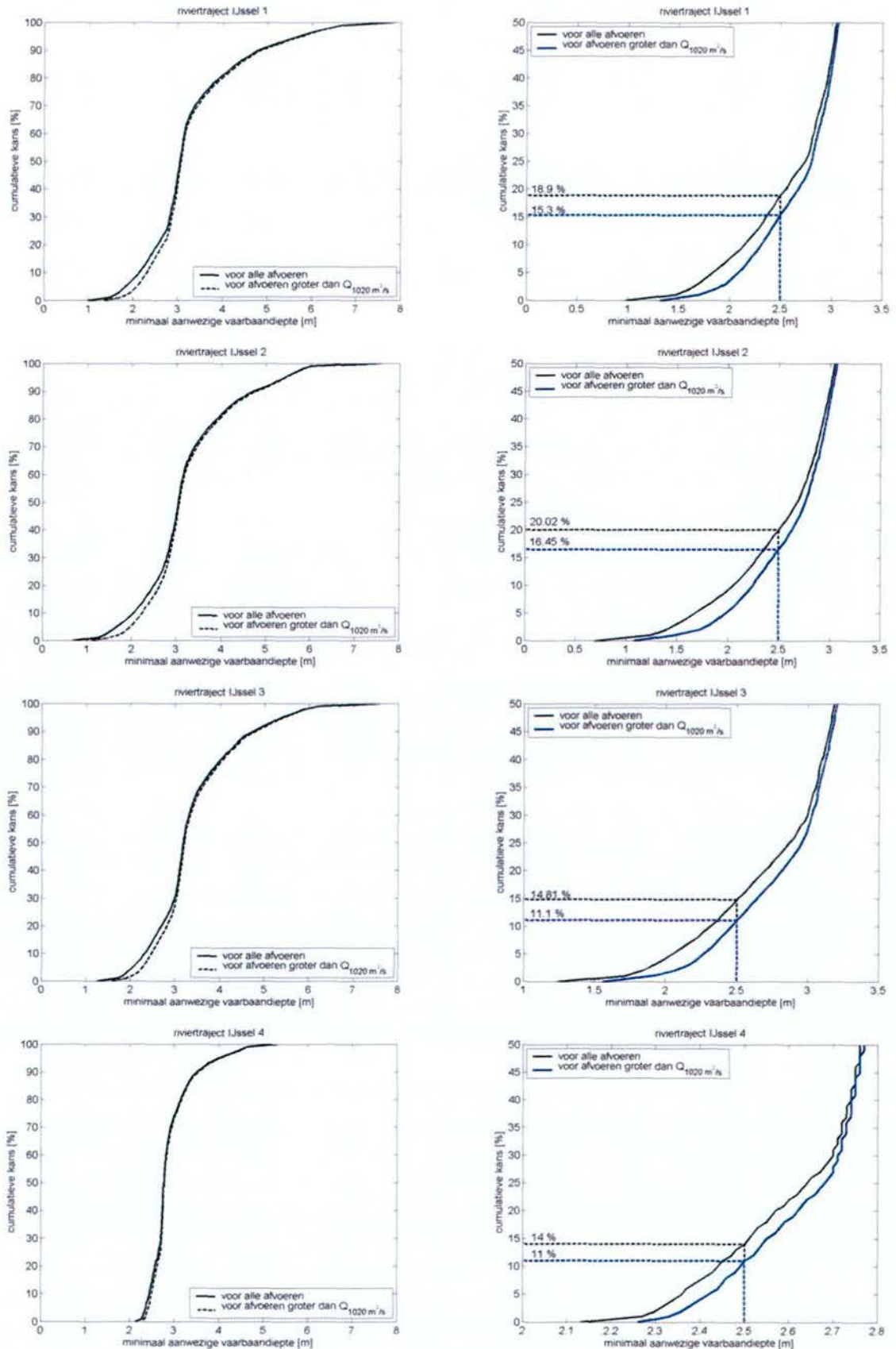
Voor de resultaten uit Figuur 4-4 en Figuur 4-5 is voor elk traject per 5-daagse tijdstep vastgesteld op welke locatie de maatgevende waterdiepte berekend is. De statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte zich op locatie x in een riviertraject bevindt, is weergegeven in Figuur 4-6. Uit deze figuur blijkt dat met name locaties met een kleine bochtstraal de bevaarbaarheid op een riviertraject beperken. Op de Waal beperken bovendien locaties met een grote variatie in stroomvoerende breedte en de locatie ter plaatse van het splitsingspunt de bevaarbaarheid. Dit betreffen de locaties tussen km 867 en km 872 op Waaltraject 2, de locaties tussen km 910 en 915 op Waaltraject 3 en het traject benedenstrooms van St. Andries op Waaltraject 4.

Om beter inzicht te krijgen in de locaties die voor de grootste scheepvaartbeperkingen zorgen kan voor elke vaardiepte het bevaarbaarheidpercentage per rivierlocatie worden bepaald. Deze zijn voor een diepgang van 2,5 en 4 m weergegeven in Figuur 4-7 en Figuur 4-8. Voor alle vaardieptes zijn de bevaarbaarheidpercentages per rivierlocatie opgenomen in Bijlage 5. Uit deze figuren blijkt dat op de Waaltrajecten 2 en 3 de bevaarbaarheid bij een grotere vaardiepte over het gehele traject achteruitgaat. Op de IJssel neemt de bevaarbaarheid sterker af ter plaatse van de locaties met scherpe rivierbochten dan op de overige locaties.





Figuur 4-4. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte per riviertraject op de Bovenrijn en Waal voor alle afvoeren en voor afvoeren groter dan de OLA van  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ .

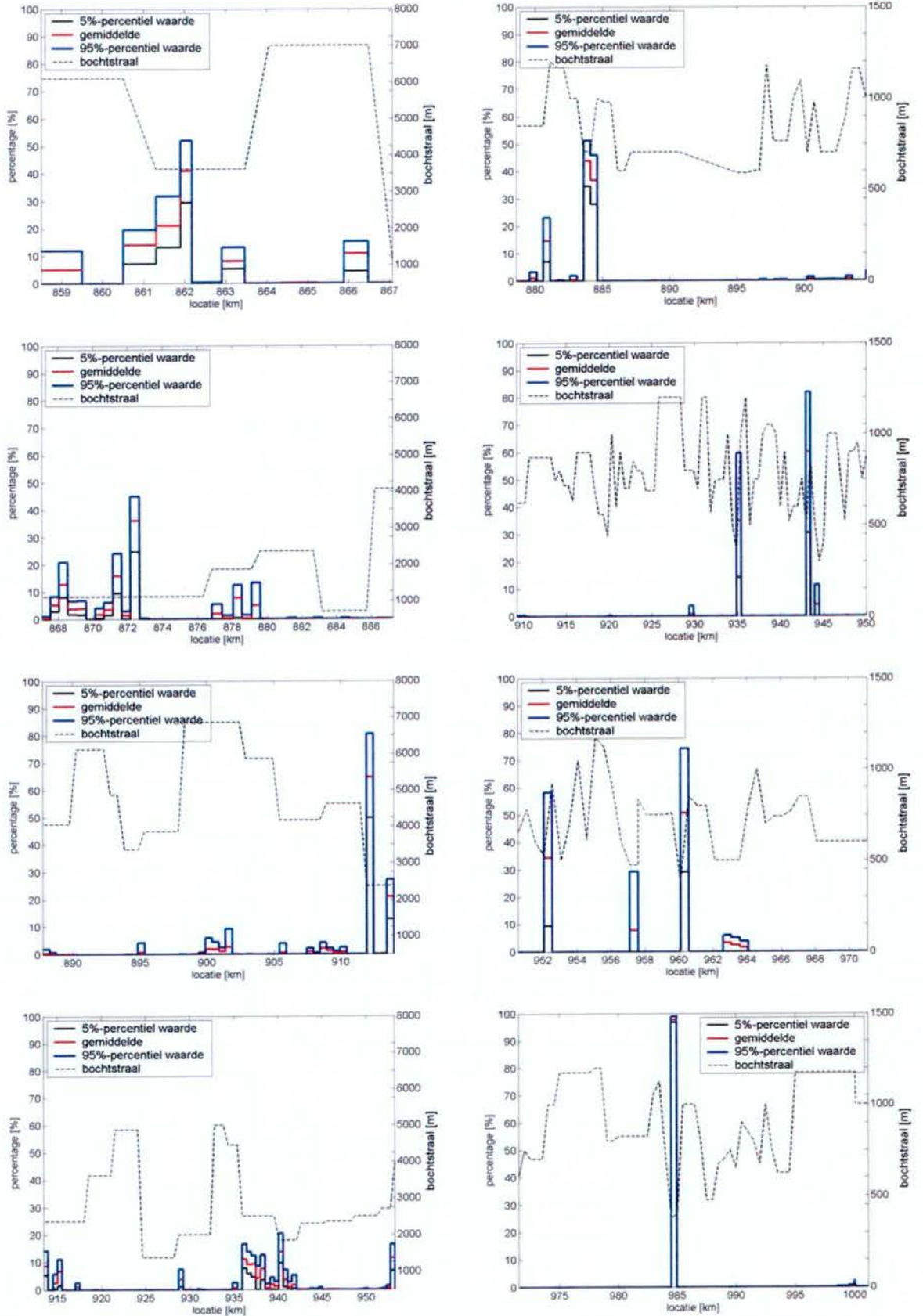


Figuur 4-5. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte per riviertraject op de IJssel voor alle afvoeren en voor afvoeren groter dan de OLA van 1020 m<sup>3</sup>/s.



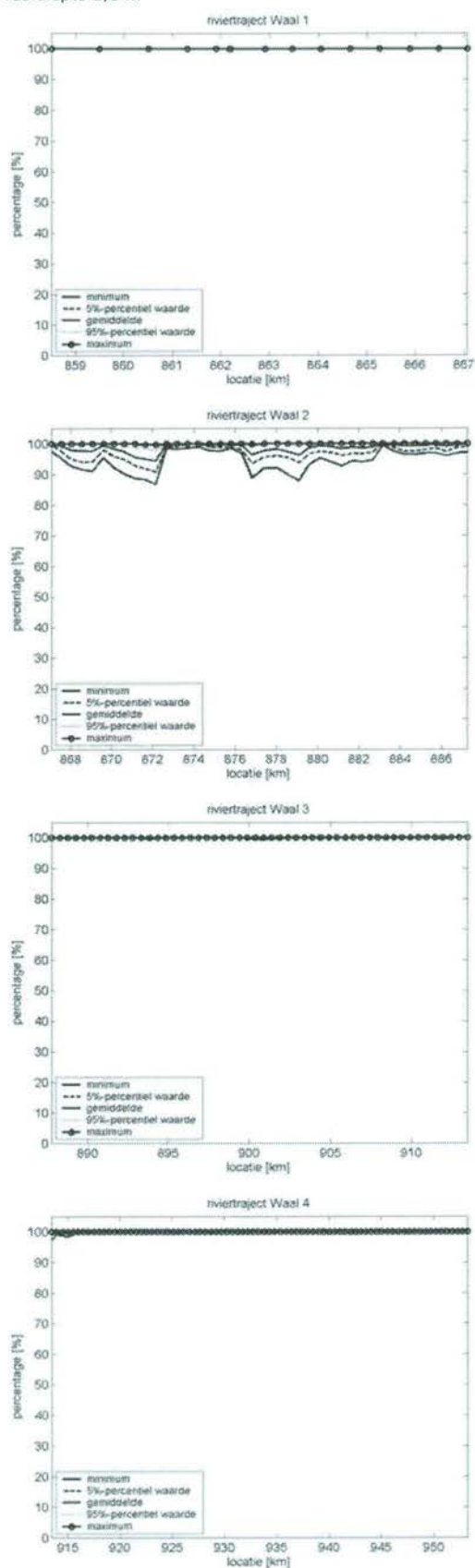
a. Bovenrijn en Waal

b. IJssel

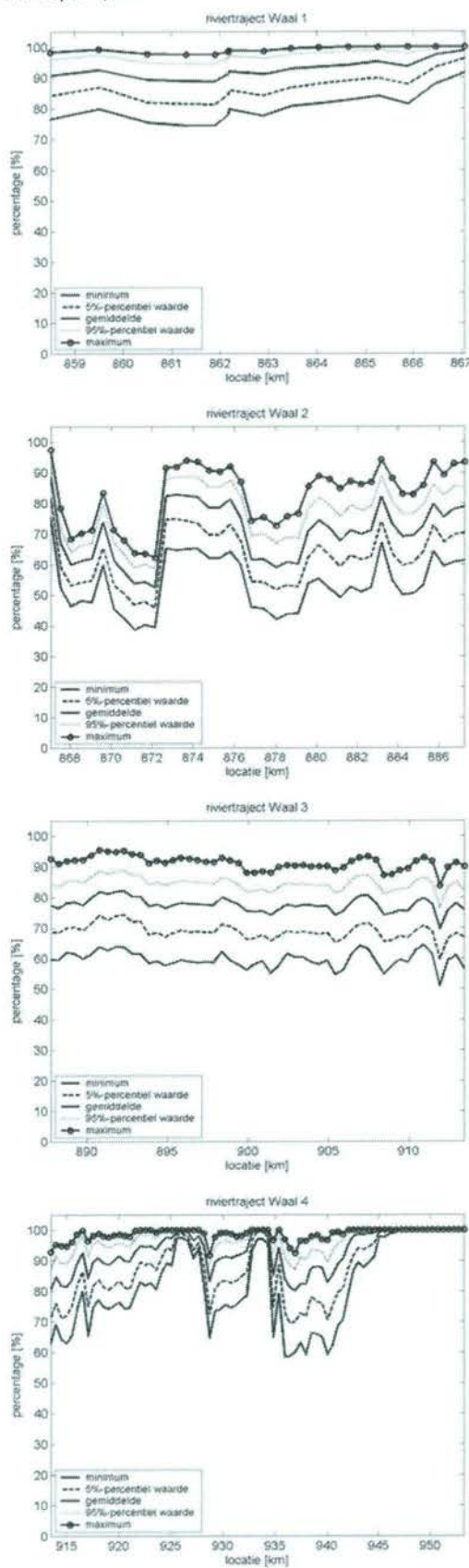


Figuur 4-6. statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte op een riviertraject zich op locatie x bevindt en de bochtstraal per rivierlocatie.

a. vaardiepte 2,5 m



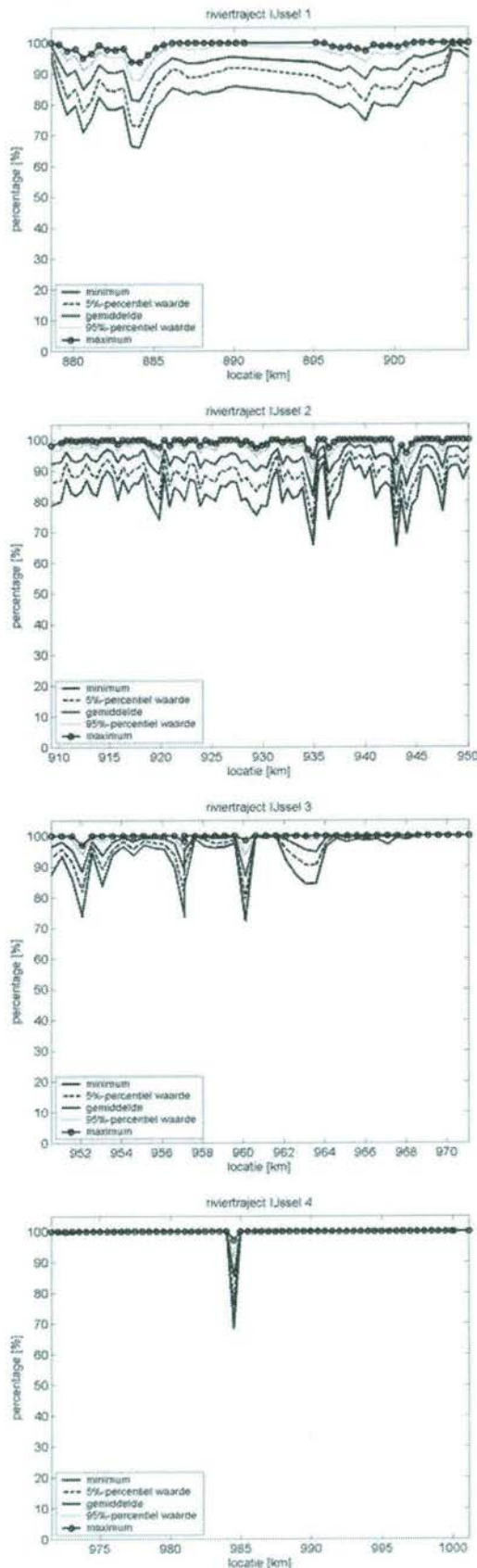
b. vaardiepte 4,0 m



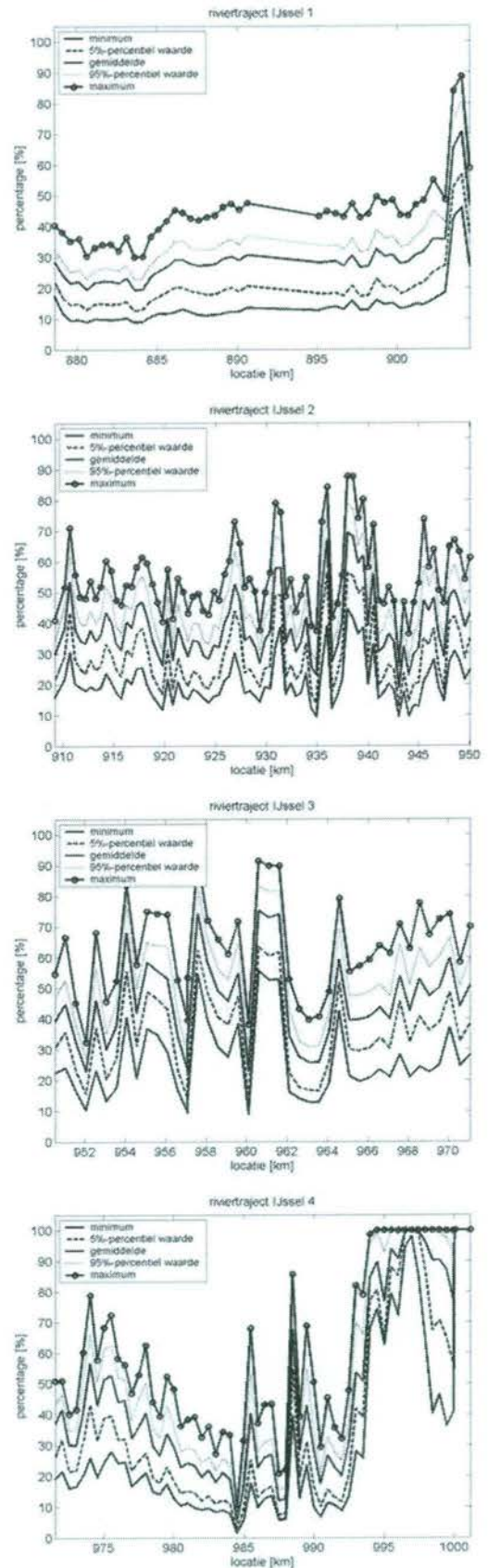
Figuur 4-7. statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie bij een vaardiepte van (a) 2,5 m en (b) 4 m op de Bovenrijn en de Waal in de periode 2003-2012.



a. vaardiepte 2,5 m



b. vaardiepte 4,0 m



Figuur 4-8. statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie bij een vaardiepte van (a) 2,5 m en (b) 4 m op de IJssel in de periode 2003-2012.



## 4.3 RvdR-basisalternatieven

Uit hoofdstuk 3 blijkt dat de rivierverruimende maatregelen in de RvdR-basisalternatieven lokaal leiden tot grote sedimentatie- en erosiepatronen en een versterkte bodemvariabiliteit. Als gevolg hiervan kunnen sommige locaties zich ontwikkelen tot nautische knelpunten. Het effect van de rivierverruimende maatregelen op de bevaarbaarheidspercentages en de locaties van de maatgevende waterdiepte is onderzocht. De resultaten, zoals de bevaarbaarheid bij variërende vaardiepten, de locaties van maatgevende waterdiepten en de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte per riviertraject zijn voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven opgenomen in Bijlage 6. De belangrijkste resultaten uit deze bijlage zijn weergegeven in Figuur 4-9 - Figuur 4-11.

De statistische karakteristieken van de kans op een vaardiepte kleiner dan 2,8 m (voor alle afvoeren en afvoeren groter dan de OLA) (en 2,5 m voor de IJssel) en 4 m (voor alle afvoeren) is voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven voor elk Waal- en IJsseltraject weergegeven in Tabel 4-1 en Tabel 4-2.

### 4.3.1 Ruimtelijk basisalternatief

#### *Waal*

Op de Waal wordt in het ruimtelijke basisalternatief vanaf het splitsingspunt (km 876) tot aan Woudrichem (km 953) een groot aantal rivierverruimende maatregelen voorgesteld. Als gevolg hiervan komt lokaal (km 924-933) de verwachtingswaarde van de bodem hoger te liggen. Op het traject km 885-898 en km 924-933 neemt de onzekerheid in bodemvariabiliteit toe (zie Figuur 3-8). De resultaten in Bijlage 6 laten zien dat het ruimtelijke basisalternatief vooral op Waaltraject 4 tot een afname van de bevaarbaarheid leidt (zie Figuur 4-9a). De cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte op Waaltraject 4 verschuift voor het ruimtelijk alternatief in Figuur 4-10a in zijn geheel naar links. Dit betekent dat de bevaarbaarheid over alle vaardieptes afneemt. Bij afvoeren groter dan de OLA neemt de kans op een vaardiepte kleiner dan de wettelijke vaarbaaneis van 2,8 m toe van 0,8% naar 2,8%. Op de andere Waaltrajecten blijft de bevaarbaarheid min of meer gelijk.

Voor het ruimtelijke alternatief wordt een verschuiving van de locaties van de maatgevende waterdiepte voorspeld op de Waaltrajecten 3 en 4. De maatgevende waterdiepte op de Waaltrajecten 3 en 4 komt frequenter te liggen op het traject km 885-890 en km 928-933 (zie Figuur 4-11a en b). Op de overige Waaltrajecten (zie Bijlage 6) is geen verschuiving van deze locaties voorspeld.

#### *IJssel*

Op de IJssel worden tot aan km 905 geen rivierverruimende maatregelen getroffen. Vanaf km 905 zijn rivierverruimende maatregelen en een grootschalige zomerbedverdieping voorgesteld. Dit leidt tot een afname van de bevaarbaarheid op het IJsseltraject 3, zie Figuur 4-9b. De afname kan worden verklaard door de waterstandverlaging als gevolg van de zomerbedverdieping in het IJsseltraject 4. Op het IJsseltraject 4 neemt de bevaarbaarheid door de zomerbedverdieping enorm toe (zie Figuur 4-9c). Voor het IJsseltraject 3 verschuift de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte in zijn geheel naar links, zie Figuur 4-10b. Dit betekent dat de bevaarbaarheid over alle vaardieptes afneemt. Bij afvoeren groter dan de OLA neemt de kans op een vaardiepte kleiner dan de wettelijke vaarbaaneis van 2,5 m toe van 11,1% naar 13,6%.

De toename van de bevaarbaarheid op het IJsseltraject 4 is te zien in verschuiving van de cumulatieve kansverdelingfunctie naar rechts. De kans op een vaardiepte kleiner dan de wettelijke vaarbaaneis van 2,5 m bij afvoeren groter dan de OLA neemt af van 11,0% naar 0%.

Op de IJsseltrajecten is de verschuiving van de locaties van de maatgevende waterdiepte relatief klein (zie Bijlage 6). Op IJsseltraject 1, 2 en 3 is geen verschuiving voorspeld. Op



IJsseltraject 4 neemt op het traject km 970-975 (voor het begin van de zomerbedverdieping) de kans op de maatgevende waterdiepte toe, zie Figuur 4-11c.

### 4.3.2 Budget basialternatief

#### Waal

De maatregelen in het budgetbasialternatief zijn hoofdzakelijk beperkt tot technische maatregelen waaronder dijkversterking. De ruimtelijke maatregelen op de Waal betreffen kribverlaging, welke een gering effect op morfologie tot gevolg hebben. Dit RvdR-alternatief heeft een gering effect op de bevaarbaarheid op de Waal (een kleine verbetering op Waaltraject 2, een kleine afname op Waaltraject 3). Voor dit alternatief is de verschuiving van de locaties waarop de maatgevende waterdiepte optreedt dan ook beperkt (zie Figuur 4-11).

#### IJssel

Het effect van het budgetbasialternatief op de bevaarbaarheid op de IJssel komt overeen met het effect dat voor het ruimtelijk alternatief is voorspeld. De bevaarbaarheid op IJsseltraject 3 neemt af. De kans op een vaardiepte kleiner dan de wettelijke vaarbaaneis van 2,5 m bij afvoeren groter dan de OLA neemt toe van 11,1% naar 14,8%. IJsseltraject 4 wordt beter bevaarbaar en reduceert de kans op een vaardiepte kleiner dan 2,5 m naar 0%.

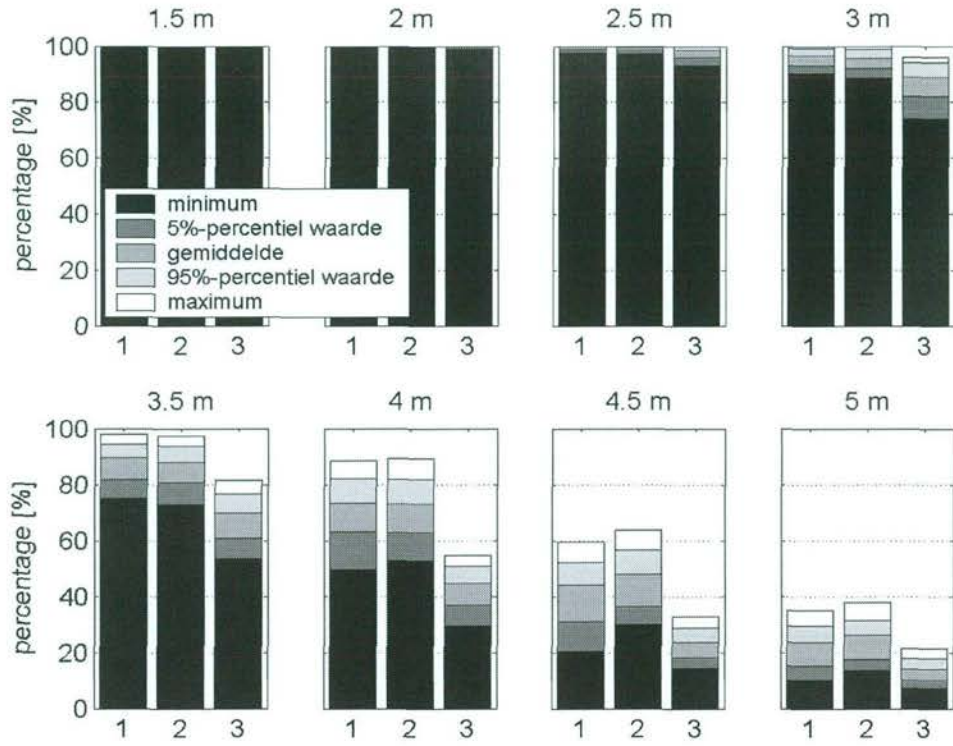
	Waal 1		Waal 2		Waal 3		Waal 4	
	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>
<i>d<sub>v</sub> &lt; 2,8 m</i>								
uitgangssit.	0.4	0	10.9	7.1	4.4	1.5	1.6	0.5
budget alt.	0.4	0	10.5	6.6	5	1.7	2.3	0.8
ruimtelijk alt.	0.4	0	11.5	7.6	4.8	1.7	5.9	2.8
<i>d<sub>v</sub> &lt; 4 m</i>	P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>	
uitgangssit.	11.3		51.5		31.1		26.4	
budget alt.	11.3		49.8		35.6		27.0	
ruimtelijk alt.	11.1		51.2		32.5		55.5	

Tabel 4-1: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,8 m (voor alle afvoeren en afvoeren groter dan OLA) en 4 m (voor alle afvoeren) per Waaltraject voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief.

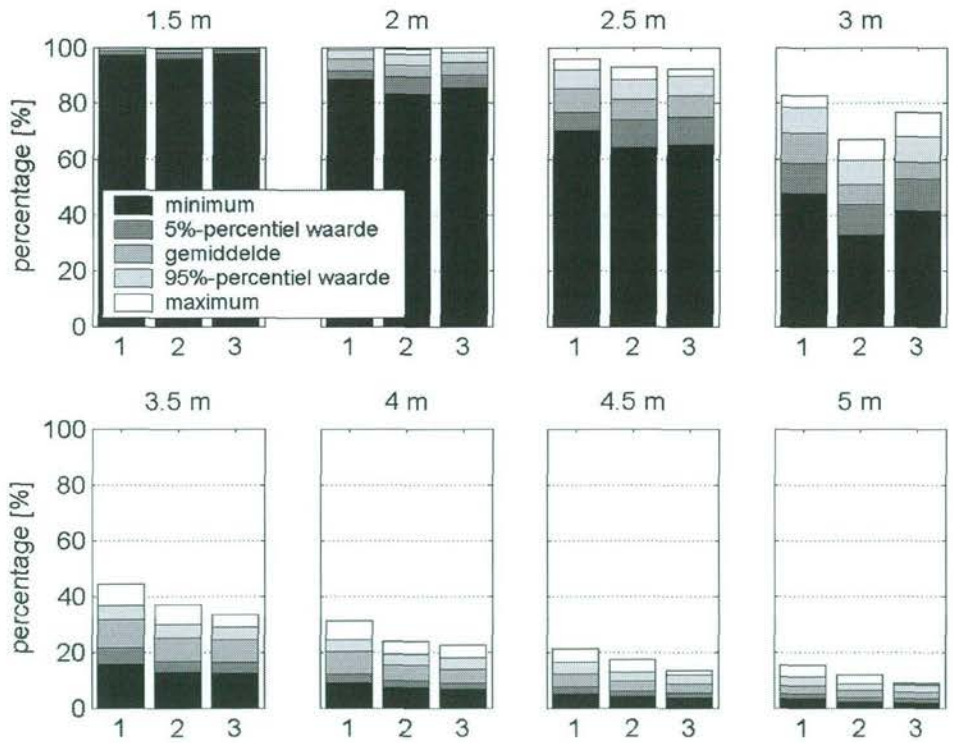
	IJssel 1		IJssel 2		IJssel 3		IJssel 4	
	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>0&gt;OLA</sub>
<i>d<sub>v</sub> &lt; 2,5 m</i>								
uitgangssit.	18.9	15.3	20.0	16.5	14.8	11.1	14	11
budget alt.	18.3	14.6	20.1	16.5	18.5	14.8	0	0
ruimtelijk alt.	18.5	14.8	20.0	16.4	17.2	13.6	0	0
<i>d<sub>v</sub> &lt; 4 m</i>	P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>		P <sub>0</sub>	
uitgangssit.	81.1		81.6		79.7		95.0	
budget alt.	81.1		82.7		84.7		89.6	
ruimtelijk alt.	82.1		84.0		86.2		90.5	

Tabel 4-2: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,5 (voor alle afvoeren en afvoeren groter dan OLA) en 4 m (voor alle afvoeren) per IJsseltraject voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief.

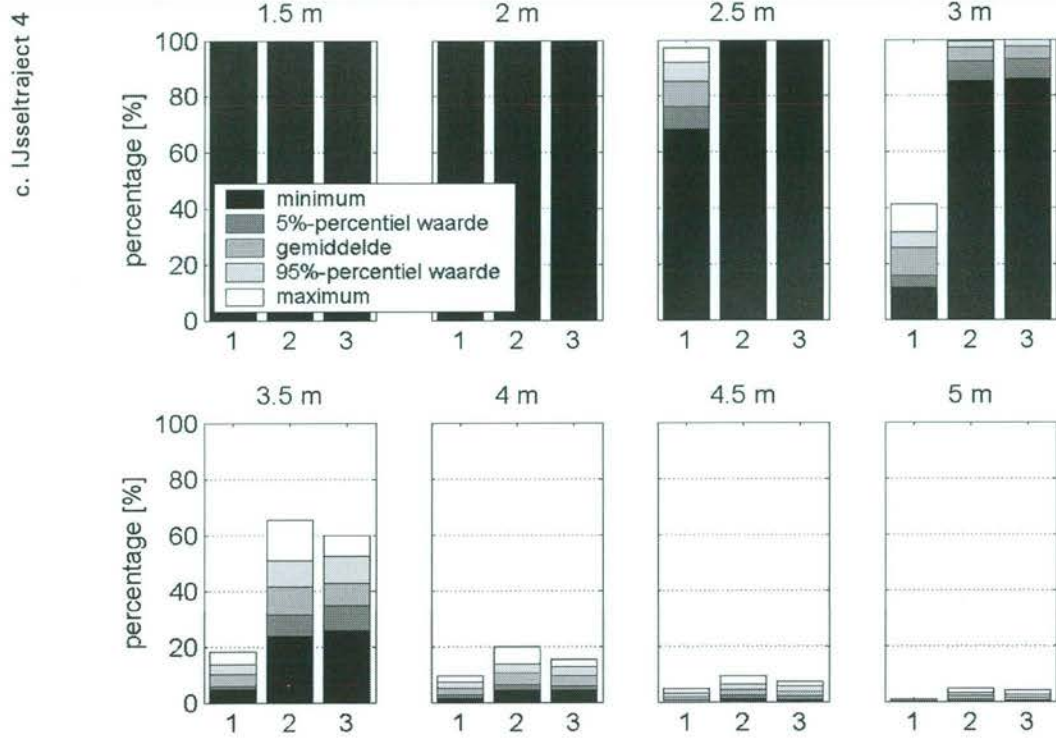
a. Waaltraject 4



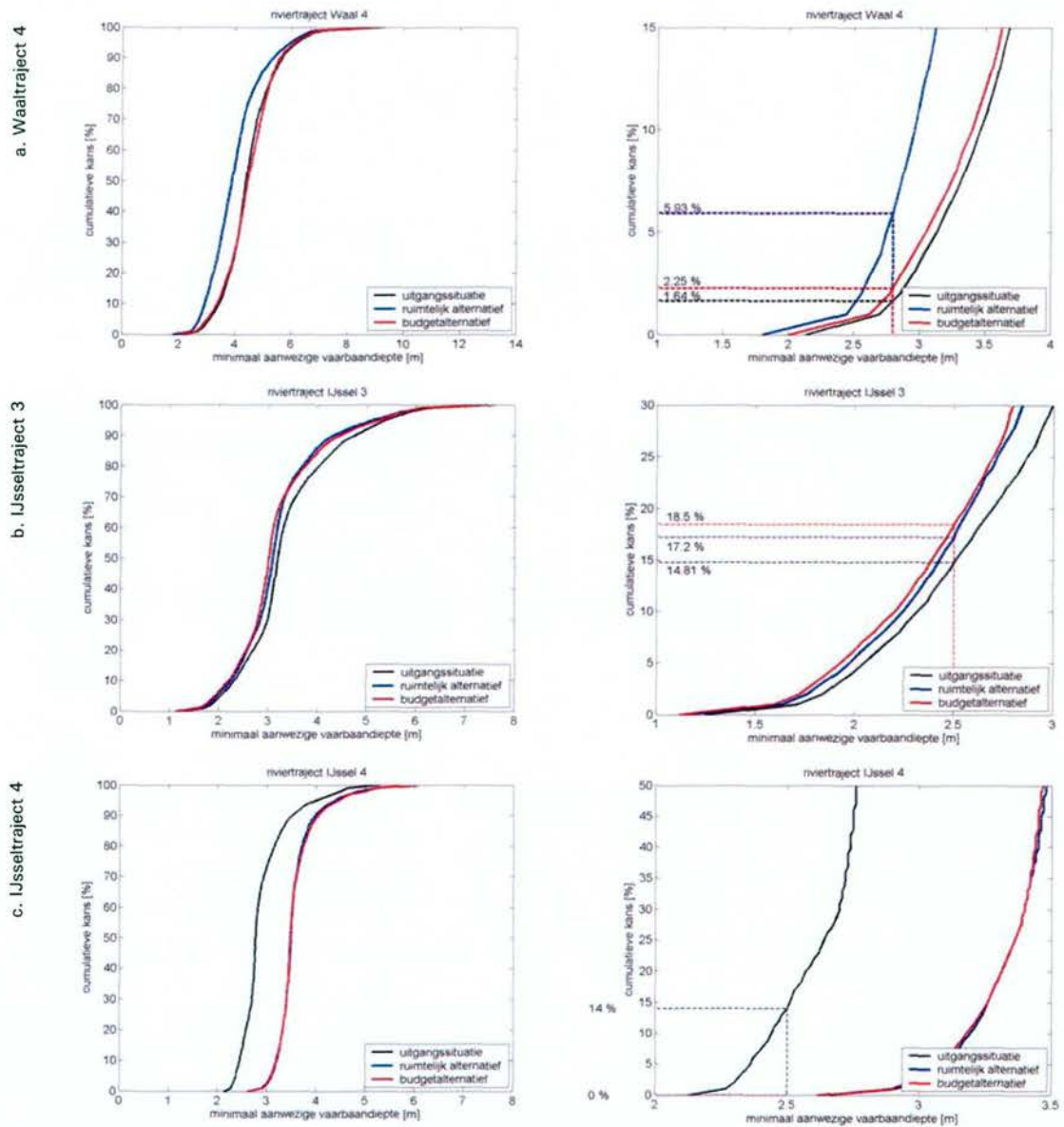
b. IJsseltraject 3







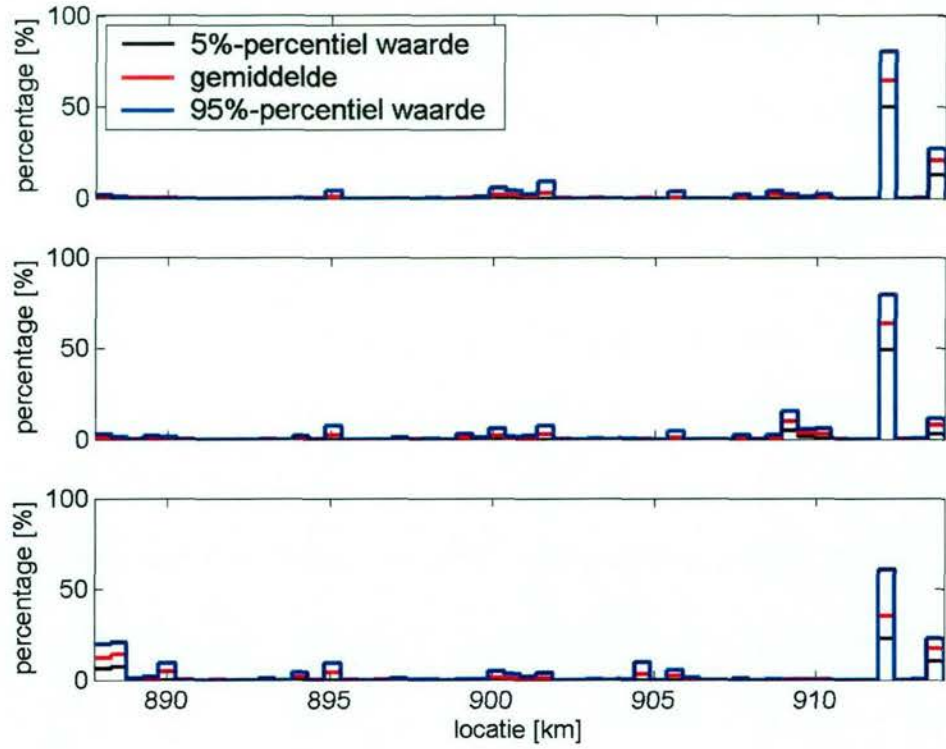
Figuur 4-9. bevaarbaarheidspercentage als functie van de vaardiepte in de periode 2003-2012 voor (1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief op (a) Waaltraject 4, (b) IJsseltraject 3 en (c) IJsseltraject 4.



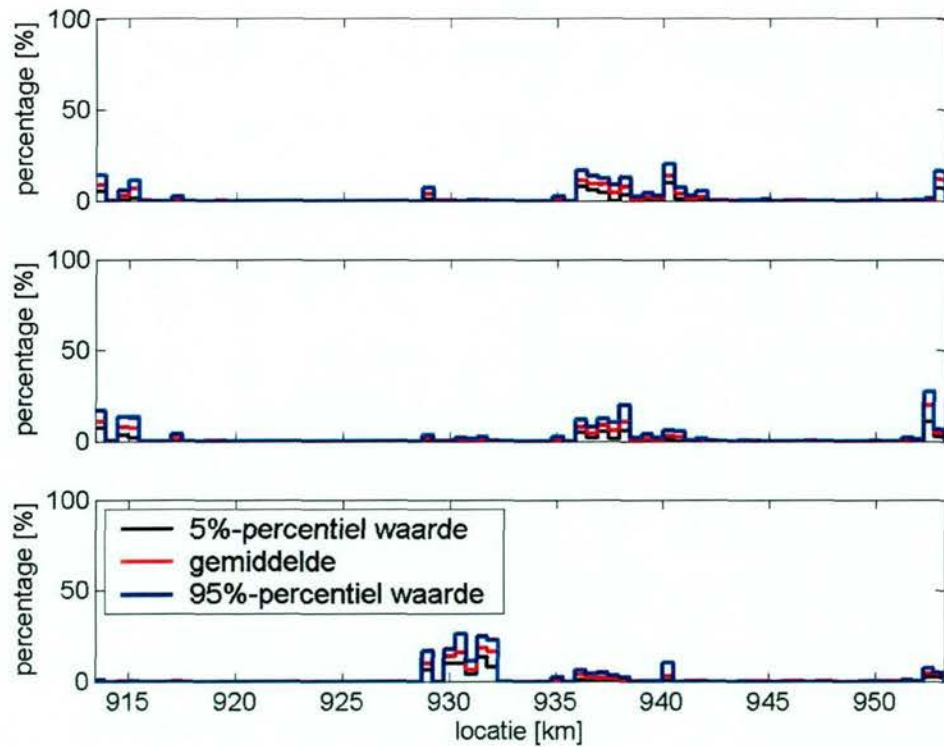
Figuur 4-10. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte voor de uitgangssituatie, het ruimtelijke alternatief en het budgetalternatief op (a) Waaltraject 4, (b) IJsseltraject 3 en (c) IJsseltraject 4.

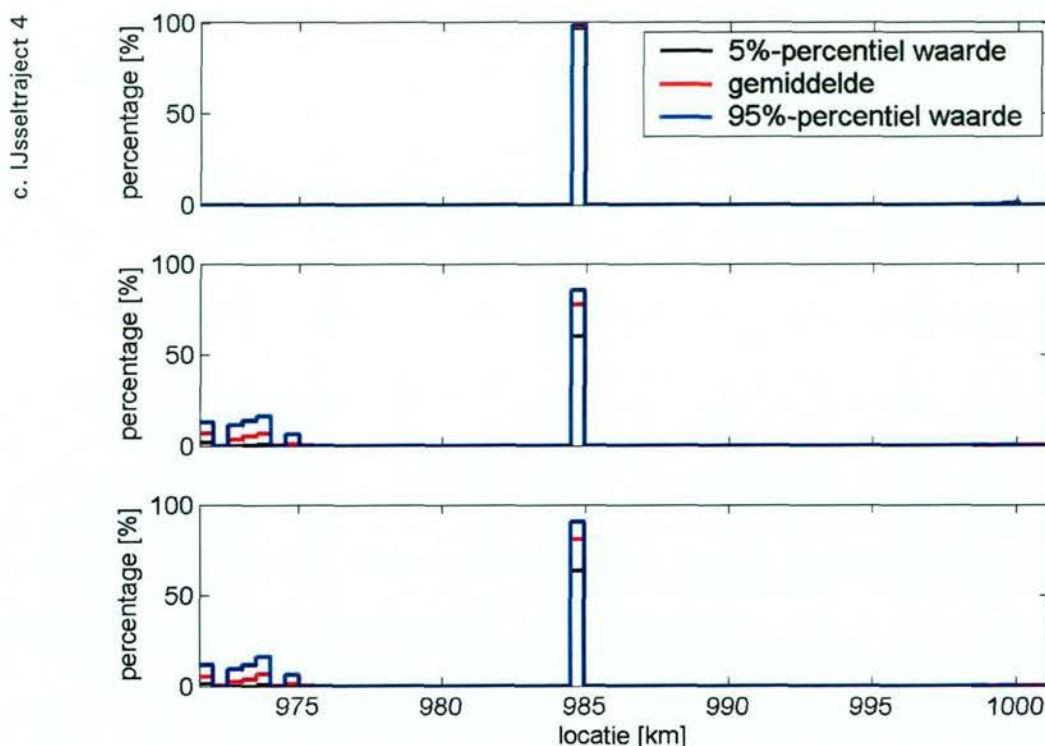


a. Waaltraject 3



b. Waaltraject 4





Figuur 4-11. statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte zich op locatie  $x$  bevindt voor riviertraject (a) Waaltraject 3, (b) Waaltraject 4 en (c) IJsseltraject 4 in de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur).

## 4.4 Conclusies

De bevaarbaarheid van de Bovenrijn, de Waal en de IJssel zonder het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk is voor de uitgangssituatie geanalyseerd in Paragraaf 4.2. De meerwaarde van Monte Carlo simulaties is aangetoond, aangezien de maatgevende representatieve waterdiepte in de vaargeul per rivierlocatie voor verschillende modelsimulaties enorm kan verschillen. Als gevolg hiervan verschillen de bevaarbaarheidspercentages voor variërende vaardiepte en de kans op een maatgevende waterdiepte kleiner dan de OLA-eis per modelsimulatie.

Voor de uitgangssituatie kan het volgende geconcludeerd worden:

- Waaltraject 2 tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen (km 867-887) is het slechtst bevaarbare riviertraject op de Waal. Op dit traject wordt niet aan de OLA-scheepvaarteis voldaan. Waaltraject 1 (de Bovenrijn) is het best bevaarbare riviertraject en voldoet aan de OLA-scheepvaarteis. De Waaltrajecten 3 en 4 (km 887-953) zijn redelijk goed bevaarbaar, maar voldoen net niet aan de OLA-scheepvaarteis.
- op de IJssel wordt op alle trajecten niet aan de OLA-scheepvaarteis voldaan. Dit komt deels door het feit dat de IJssel niet is meegegroeid met de enorme schaalvergroting die in de scheepvaartsector heeft plaatsgevonden. Anderzijds zorgen de rivierbochten met een kleine bochtstraal voor scheepvaarthinder. De bovenstroomse trajecten zijn het minst goed bevaarbaar.
- op de Rijntakken zorgen met name de locaties met de kleinste bochtstralen voor de scheepvaartbeperkingen. De kans dat op deze locaties de maatgevende waterdiepte in een bepaald riviertraject wordt bepaald is groot. Op deze locaties is het bodemdwaarsverhang



groot en wordt een grote correctie toegepast op de zomerbed-gemiddelde waterdiepten (zie ook paragraaf 2.4.2).

De invloed van de ruimtelijke maatregelen van de RvdR-alternatieven op de bevaarbaarheid is in Paragraaf 4.3 onderzocht.

De belangrijkste conclusies voor de Bovenrijn en de Waal zijn:

- het ruimtelijk alternatief leidt op Waaltraject 4 (km 913-953) tot een duidelijke verslechtering van de bevaarbaarheid. De kans dat niet aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan neemt toe. Bovendien wordt een verschuiving van de knelpuntlocaties voorspeld. De kans op een maatgevende waterdiepte op de locaties waar grootschalig wordt ingegrepen (km 885-890 op Waaltraject 3 en km 929-933 op Waaltraject 4) wordt groter.
- het budgetalternatief heeft nauwelijks effect op de bevaarbaarheid van de Bovenrijn en de Waal.

De belangrijkste conclusies voor de IJssel zijn:

- het ruimtelijke en budgetalternatief leiden tot vergelijkbare effecten op de bevaarbaarheid.
- de bevaarbaarheid op het benedenstroomse gedeelte van de IJssel (traject 4 - km 971-1000) neemt door de zomerbedverdieping enorm toe. De waterstandsverlaging bovenstrooms van dit traject als gevolg van de zomerbedverdieping zorgt voor een verslechtering van de bevaarbaarheid op IJsseltraject 3 (km 950-971). De bevaarbaarheid op de IJssel tussen de IJsselkop en km 950 wordt nauwelijks beïnvloed door de rivierverruimende maatregelen. Een kleine verschuiving van de locaties waarop de maatgevende waterdiepte wordt berekend is te zien op IJsseltraject 4. De kans op een maatgevende waterdiepte direct bovenstrooms van de zomerbedverdieping (km 971-975) neemt toe.

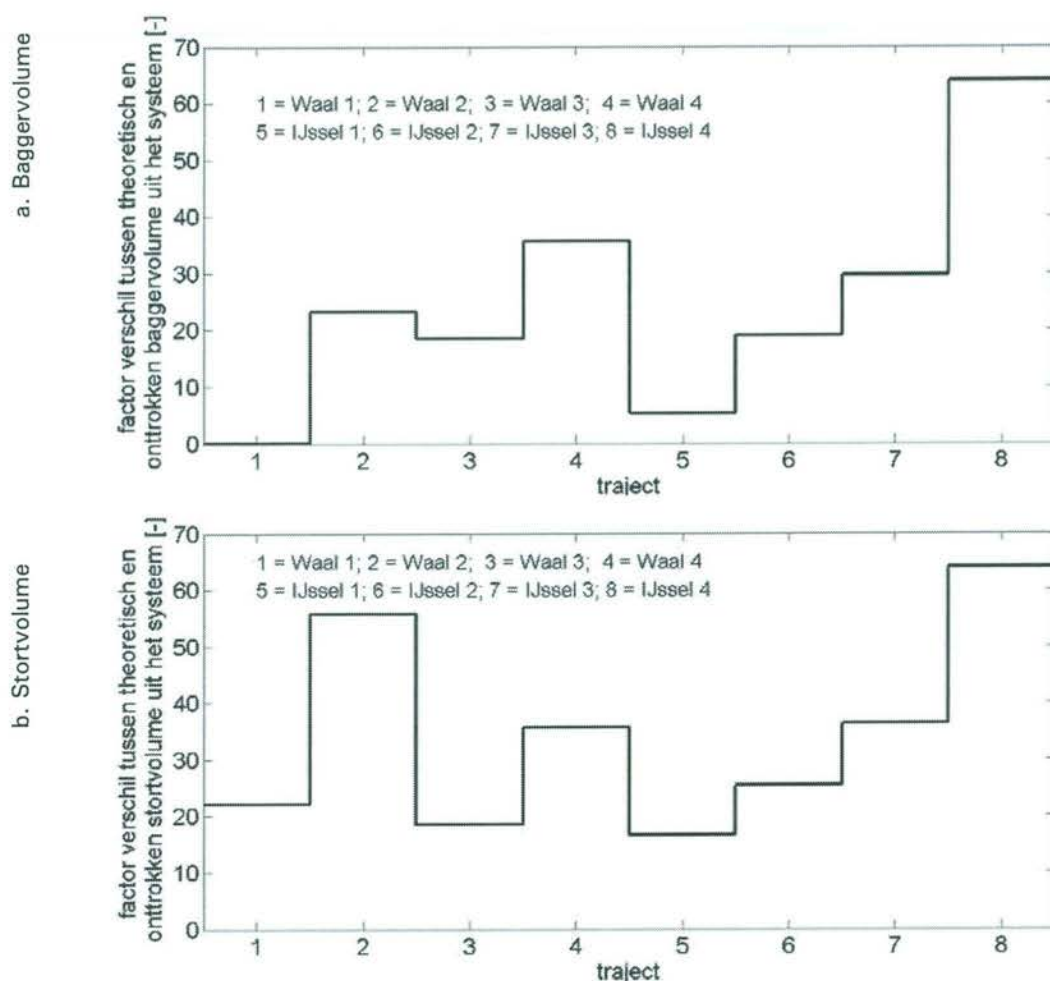
## 5 Onderhoudsbaggerwerk Rijntakken

### 5.1 Inleiding

Voor een veilig, vlot en rendabel transport over water worden eisen gesteld aan het profiel van de vaargeul bij afvoeren hoger dan de OLA, die gemiddeld 5% van het jaar wordt onderschreden. In het voorgaande hoofdstuk is aangetoond, dat de Rijntakken in zowel huidige situatie als na mogelijke herinrichting zonder aanvullende maatregelen niet aan deze eis voldoen. Om het vereiste profiel van de vaargeul te garanderen, kunnen zowel constructieve maatregelen als periodiek baggeren worden uitgevoerd. In deze studie wordt de maatregel periodiek baggeren toegepast. De methodiek om de omvang van het onderhoudsbaggerwerk te bepalen staat beschreven in Paragraaf 2.5. De vaarbaaneisen uit Tabel 2-1 van paragraaf 2.4 zijn hierbij gebruikt. De bagger- en terugstortvolumes uit de berekeningen zijn als functie van ruimte en tijd gearchiveerd. Met behulp van deze resultaten zijn de statistische karakteristieken bepaald van het onderhoudsbaggerwerk, het terugstortvolume en de afstand tussen de baggerlocaties en de terugstortlocaties. De resultaten van het onderhoudsbaggerwerk en het effect op de bevaarbaarheid in de uitgangssituatie en voor de RvdR-basisalternatieven staan in Paragraaf 5.2 en Paragraaf 5.3.

In Paragraaf 2.5 is onderscheid gemaakt tussen het theoretisch vereiste baggervolume (zie formule 5 en gearceerde driehoekje in Figuur 2-3) en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie wordt onttrokken (zie formule 6). Door het gebruik van een 1D-model worden zowel de morfologische veranderingen als de sedimentonttrekkingen en -toevoegingen gespreid over de sedimenttransporterende breedte van het zomerbed. Indien we 'slechts' de theoretische vereiste volumes verwijderen en terugstorten zal op het eerstvolgende tijdstip weer een scheepvaartprobleem worden geconstateerd en zal de bevaarbaarheid van de rivier niet voldoende verbeteren. Daarom is besloten de rivier over de gehele sedimenttransporterende breedte te verdiepen, zodanig dat de representatieve waterdiepte in de vaargeul gelijk is aan de OLA-diepte-eis. Dit leidt tot een overschatting van de baggervolumes. Het theoretische baggervolume en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken vormen samen de bandbreedte van twee uitersten. Het theoretische volume is een onderschatting van de werkelijkheid, omdat in de praktijk een overdiepte zal worden aangehouden tijdens het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk. Het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken vormt door de enorme overschatting de bovengrens. In Bijlage 7 wordt ingegaan op het verschil tussen de beide baggervolumes. Het verschil tussen beide baggervolumes is afhankelijk van het bodemdwaarsverhang (en dus de bochtstraal) en de verhouding tussen vaarbaanbreedte en sedimenttransporterende breedte en varieert per riviertraject. Op de IJssel neemt dit verschil in benedenstroomse richting toe. Dit komt doordat de sedimenttransporterende breedte in benedenstroomse richting toeneemt. Het verschil tussen de gemiddelde volumes kan oplopen tot een factor 60 (zie Figuur 5-1).





*Figuur 5-1. factor verschil tussen (a) het gemiddelde theoretische baggervolume en het volume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem is onttrokken per riviertraject en (b) het gemiddelde theoretische stortvolume en het volume dat gedurende de modelsimulatie in het systeem is gestort per riviertraject.*

De analyse in dit hoofdstuk beperkt zich tot het theoretisch vereiste baggervolume, omdat deze volumes beter bij de volumes zullen aansluiten die in werkelijkheid uit de rivier worden onttrokken. In de berekeningen is uiteraard rekening gehouden met de baggervolumes over de gehele sedimenttransporterende breedte. Bij het zoeken naar geschikte stortlocaties is ook met de grote baggervolumes gerekend.

Het teruggestorte sediment kan op een later tijdstip voor scheepvaartproblemen zorgen op de terugstortlocatie of een locatie benedenstrooms van deze locatie. Dit kan tot een toename van het totale baggerwerk leiden.

## 5.2 Uitgangssituatie

### 5.2.1 Onderhoudsbaggerwerk

Het resulterende onderhoudsbaggerwerk, de terugstortvolumes en de afstand tussen bagger- en stortlocaties in de uitgangssituatie zijn weergegeven in Figuur 5-2 - Figuur 5-5. Figuur 5-2 laat de statistische karakteristieken zien van het bagger- en stortvolume per rivierlocatie voor (a) de Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel. De statistische karakteristieken van de volumes per riviertraject zijn in Figuur 5-3 gegeven. Figuur 5-4 en Figuur 5-5 geven inzicht in de afstand tussen bagger- en stortlocatie per rivierlocatie en per riviertraject.

## Onderhoudsbaggerwerk per riviertraject

### *Waal*

Op de Waal voldoet met name traject Waal 2 niet aan de OLA-scheepvaartseisen. Op dit traject wordt dan ook veel onderhoudsbaggerwerk berekend. De locaties waar onderhoudsbaggerwerk wordt uitgevoerd vallen samen met de locaties waarop frequent de maatgevende waterdiepte is voorspeld (het bochtige riviertraject benedenstrooms van de Pannerdense Kop tot aan Nijmegen, zie Figuur 4-6). De baggervolumes worden bovenstrooms in het Waaltraject 1 (de Bovenrijn) teruggestort. Op de andere trajecten wordt redelijk aan de scheepvaartseis voldaan en is het onderhoudsbaggerwerk significant kleiner. Op Waaltraject 3 beperkt het onderhoudsbaggerwerk zich tot het traject km 905-915.

De resultaten van 3 afzonderlijke modelsimulaties en de statistische karakteristieken van het bagger- en stortvolume per riviertraject voor de Bovenrijn en de Waal zijn weergegeven in Figuur 5-3a. Uit de figuur blijkt dat het bagger- en stortvolume aanzienlijk verschillen per modelsimulatie. Op de Waaltraject 3 en 4 betekent het zelfs dat gedurende de ene modelsimulatie (bijvoorbeeld simulatie 1) wel wordt gebaggerd, terwijl gedurende andere modelsimulaties (bijvoorbeeld simulaties 2 en 3) niet wordt gebaggerd.

Op basis van de berekeningen wordt op de Bovenrijn en de Waal gemiddeld jaarlijks 18.100 m<sup>3</sup> gebaggerd. Dit varieert met een kans van 90% tussen 2.150 en 45.200 m<sup>3</sup>.

### *IJssel*

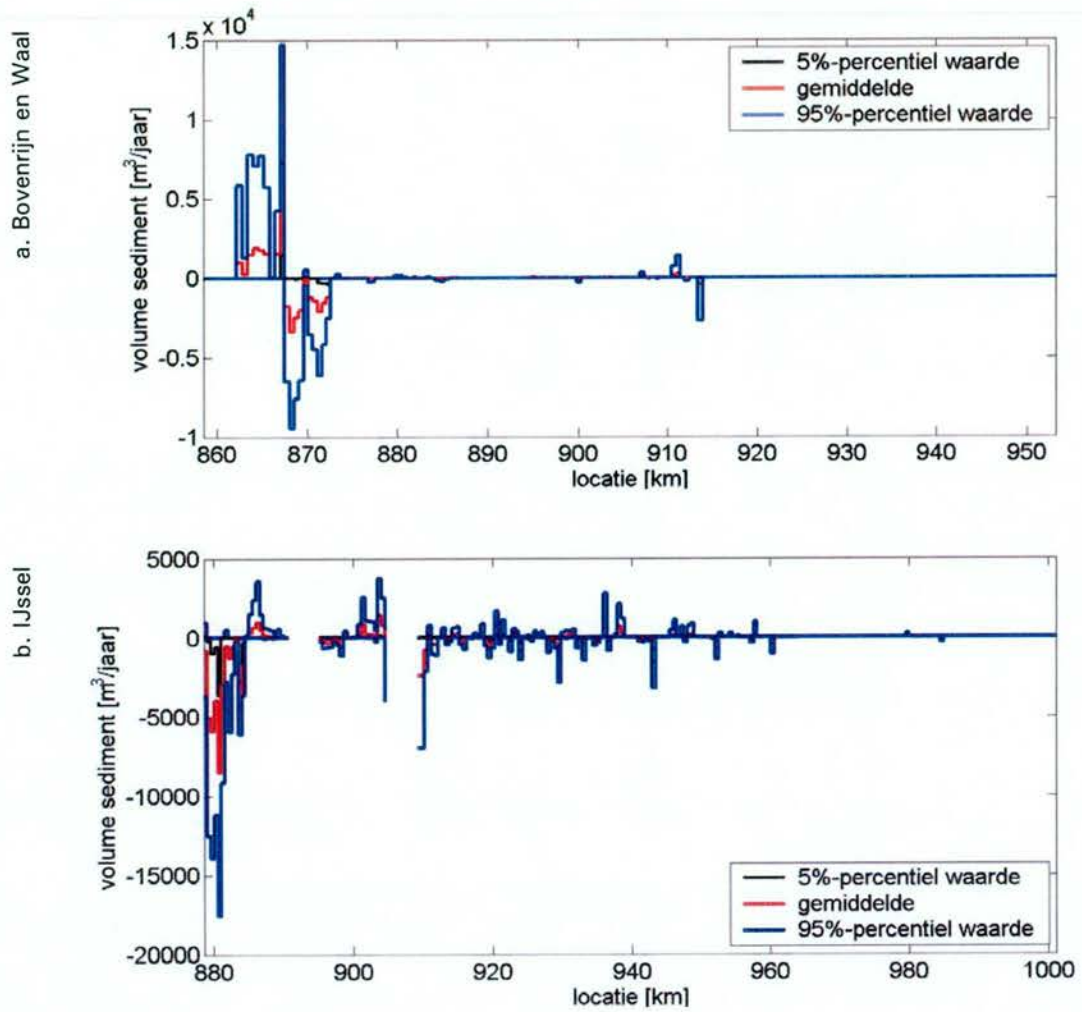
Op de IJssel wordt op alle trajecten niet aan de scheepvaartseisen voldaan. De grootste problemen worden voorspeld op de trajecten 1 en 2. De baggervolumes nemen in benedenstroomse richting af. Op IJsseltrajecten 1 en 2 (km 905-950) wordt zowel gebaggerd als teruggestort. De locaties waarop onderhoudsbaggerwerk noodzakelijk is, zijn voornamelijk bochtige riviergedeelten met ondiepten in de binnenbocht als gevolg van een groot dwarsverhang.

Op basis van de berekeningen wordt op de gehele IJssel gemiddeld jaarlijks 51.600 m<sup>3</sup> gebaggerd. Dit varieert met een kans van 90% tussen 23.700 en 98.800 m<sup>3</sup>.

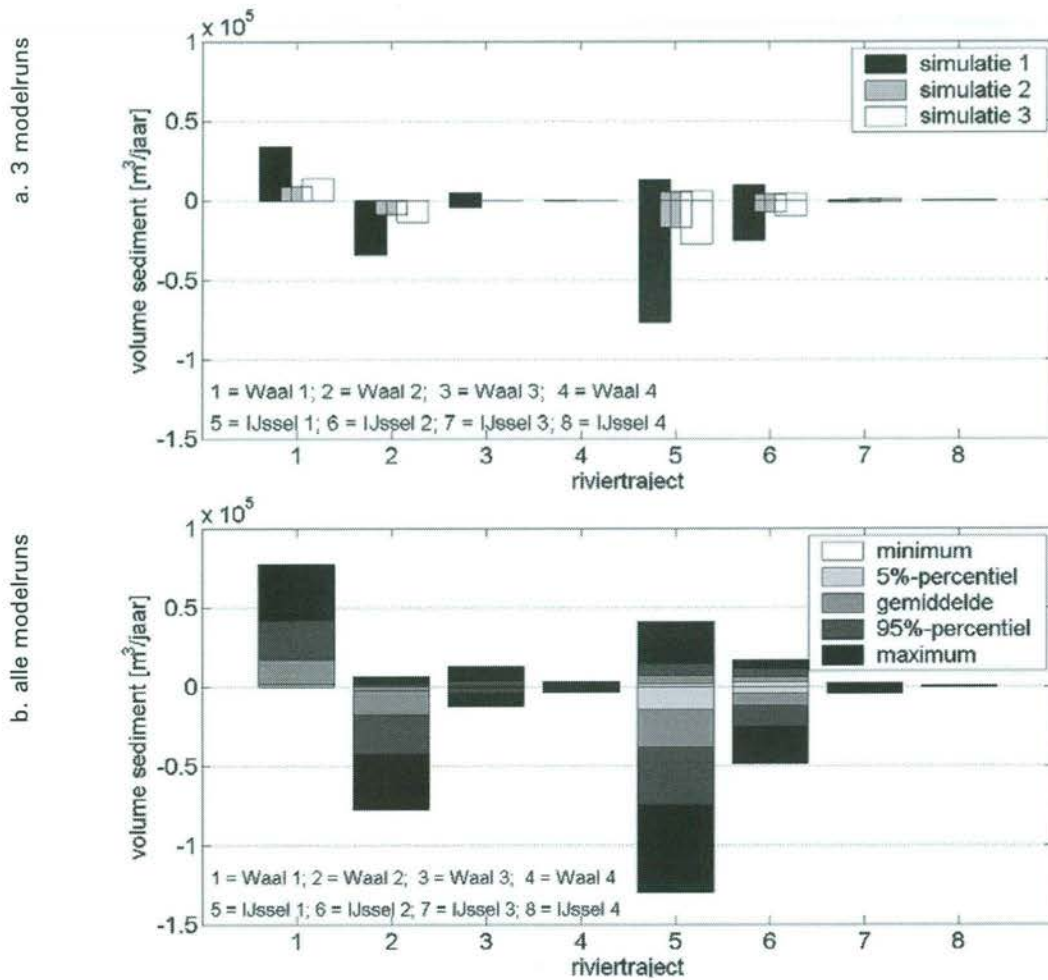
### **Totaal onderhoudsbaggerwerk op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel**

Uit de Monte Carlo simulaties volgt dat jaarlijks gemiddelde 69.800 m<sup>3</sup> wordt gebaggerd op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel. Het minimum en maximum baggervolume volgend uit de 400 modelsimulaties is respectievelijk 16.500 en 223.500 m<sup>3</sup>. Met een kans van 90% varieert het totaal jaarlijkse baggervolume tussen de 28.400 en 135.900 m<sup>3</sup>.





Figuur 5-2. statistische karakteristieken van het bagger- en stortvolume per rivierlocatie voor de (a) Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel (negatieve waarde duidt op een baggervolume, positieve waarde duidt op een stortvolume).



Figuur 5-3. (a) de bagger- en stortvolumes voor 3 afzonderlijke modelsimulaties en (b) de statistische karakteristieken van het bagger- en stortvolume sediment per riviertraject (negatieve waarde duidt op een baggervolume, positieve waarde duidt op een stortvolume).

**Storten:**

Storten	Waal 1	Waal 2	Waal 3	Waal 4	IJssel 1	IJssel 2	IJssel 3	IJssel 4
maximum	77500	6660	12650	3450	40870	16760	2080	540
95%-percentiel	42110	1850	3940	0	14930	11440	1350	320
gemiddelde	16820	700	570	10	7260	5960	580	150
5%-percentiel	1610	0	0	0	1910	2970	20	30
minimum	0	0	0	0	0	0	0	0

**Baggeren:**

Baggeren	Waal 1	Waal 2	Waal 3	Waal 4	IJssel 1	IJssel 2	IJssel 3	IJssel 4
maximum	0	77690	12645	3450	129680	48310	4360	540
95%-percentiel	0	42290	3940	0	74980	25170	2100	320
gemiddelde	0	17520	570	10	38100	12100	1290	150
5%-percentiel	0	2140	0	0	14510	4460	650	30
minimum	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 5-1: statistieken bagger- en stortvolumes uitgangssituatie per riviertraject



### Afstand tussen bagger- en stortlocatie

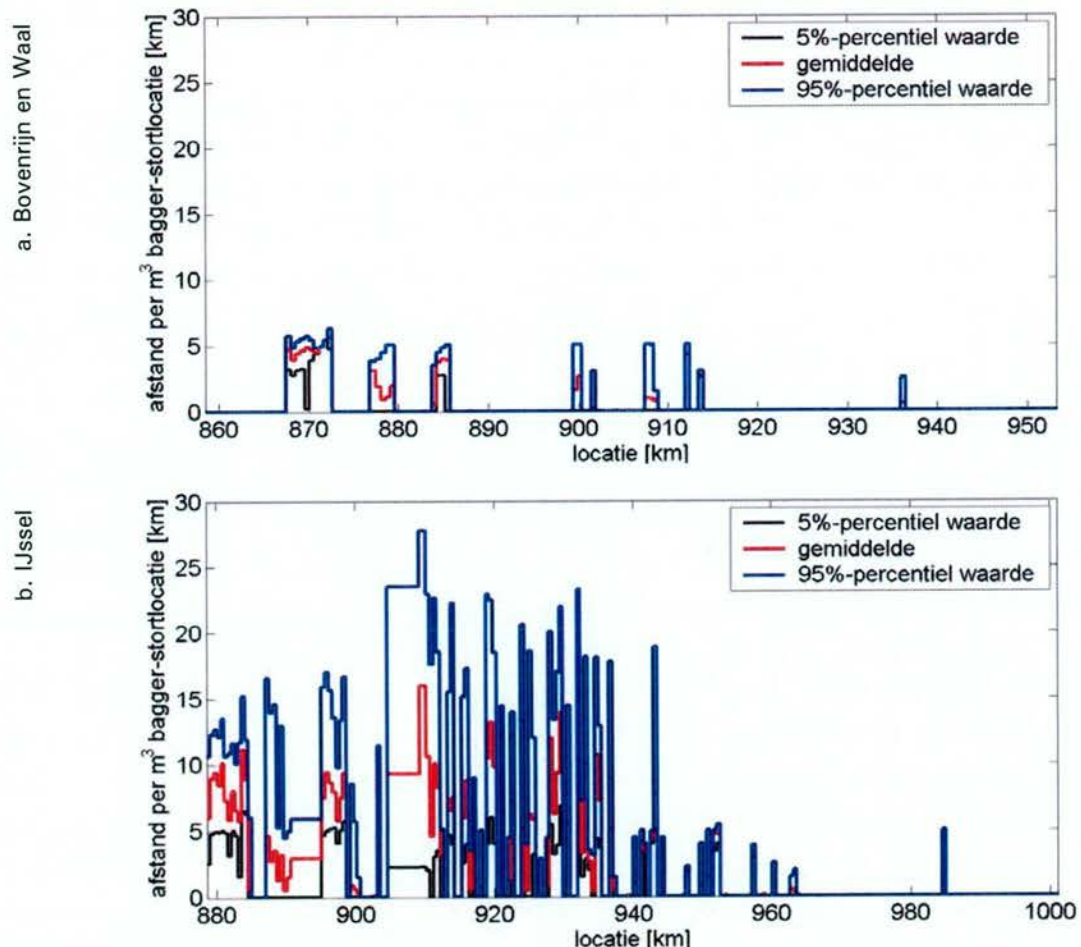
De afstand per m<sup>3</sup>-baggervolume tussen de bagger- en stortlocatie staan per rivierlocatie en per riviertraject gegeven in Figuur 5-4 en Figuur 5-5. In Paragraaf 2.5 is gekozen het volume dat gebaggerd is op locatie x terug te storten op de locatie met de grootste beschikbare waterdiepte (mits groter dan de minst toelaatbare waterdiepte bij OLA) in het traject 1,5-5 km bovenstrooms van baggerlocatie x. Mocht dit traject onvoldoende terugstortvolume bevatten, dan wordt het baggervolume teruggestort op de eerste locatie met voldoende ruimte bovenstrooms van het terugstorttraject.

#### Waal

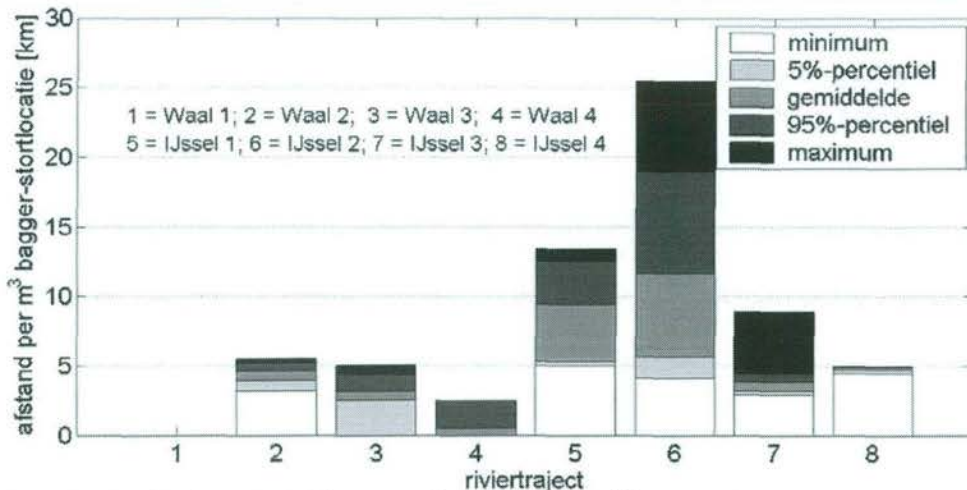
Op de Bovenrijn en de Waal biedt het terugstorttraject van 1,5 - 5 km bovenstroomse van de baggerlocatie voldoende ruimte om de baggervolumes terug te storten. Slechts in enkele gevallen wordt voor locaties op Waaltraject 2 bovenstrooms van het beoogde traject van 1,5 - 5 km teruggestort. De afstand tussen bagger- en stortlocatie is op de Bovenrijn en de Waal significant kleiner dan op de IJssel.

#### IJssel

Op de IJssel worden op traject 1 en 2 zeer frequent de baggervolumes teruggestort meer dan 5 km bovenstrooms van de baggerlocatie. Op deze trajecten zijn de scheepvaartproblemen het grootste en doen ze zich voor op vrijwel alle rivierlocaties. Vaak is er geen ruimte binnen het eigen riviertraject en wordt het sediment verder bovenstrooms gestort op het Pannerdens Kanaal en incidenteel op de Bovenrijn.



Figuur 5-4. statistische karakteristieken van de afstand tussen de baggerlocatie en de terugstortlocatie per rivierlocatie voor (a) de Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel.



Figuur 5-5. statistische karakteristieken van de afstand per m<sup>3</sup>-baggervolume tussen de bagger- en terugstortlocatie per riviertraject.

### 5.2.2 Effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid

Doel van onderhoudsbaggerwerk is om de bevaarbaarheid met voldoende breedte en diepte te garanderen bij afvoeren boven OLA. Het effect van onderhoudsbaggerwerk op de bevaarbaarheid in de uitgangssituatie is weergegeven in Bijlage 8. De belangrijkste resultaten zijn samengevat in Figuur 5-6 - Figuur 5-8 en Tabel 5-2 en Tabel 5-3.

Figuur 5-6 en Figuur 5-7 geven de cumulatieve kansverdelingen van de maatgevende waterdiepte per riviertraject voor de uitgangssituatie zonder en met onderhoudsbaggerwerk. Een verschuiving van de kansverdeling naar rechts duidt op een verbetering voor de scheepvaart. Verschuift de kansverdeling naar links, dan nemen de scheepvaartcondities af.

Tabel 5-2 en Tabel 5-3 geven de kansen op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,8 (en 2,5 m voor de IJssel) en 4 m voor alle afvoeren voor de uitgangssituatie zonder en met onderhoudsbaggerwerk. In deze tabellen zijn ook de conditionele kansen op een representatieve waterdiepte kleiner dan 2,8 m (resp. 2,5 m) voor afvoeren groter dan de OLA opgenomen. Groene getallen in de tabel geven aan dat de scheepvaartcondities door onderhoudsbaggerwerk verbeteren. Rode getallen duiden op een verslechtering.

Figuur 5-8 geeft aan hoe de kans dat een maatgevende waterdiepte zich op locatie x bevindt verandert voor Waaltraject 1 en IJsseltraject 1 indien onderhoudsbaggerwerk wordt uitgevoerd.

Bij alle analyses moet worden gerealiseerd, dat voor de bepaling van het onderhoudsbaggerwerk wordt uitgegaan van een zodanige verdieping dat de representatieve vaarwegdiepte overeenkomt met de OLA-diepte-eis. Er is geen rekening gehouden met een overdiepte. Dat wil zeggen dat bij een kleine verondieping na het onttrekken van het onderhoudsbaggerwerk, het riviertraject direct niet meer aan de OLA-scheepvaarteis voldoet. Dit geeft direct aan dat ondanks de overschatting van het baggervolume, door onttrekking over de gehele sedimenttransporterende breedte, de bevaarbaarheid wordt onderschat. In werkelijkheid zal minder worden gebaggerd, vooral daar waar de ondiepte zit (in de binnenbocht), en daar zal dan ook overdiepte worden gebaggerd.

#### Waal

Op Waaltraject 1 (de Bovenrijn) wordt uitsluitend sediment teruggestort in de rivier. Op dit traject wordt geen onderhoudsbaggerwerk uitgevoerd. Dit leidt tot een kleine verslechtering voor de scheepvaart. De cumulatieve kansverdeling verschuift naar links in Figuur 5-6. Ondanks deze afname blijft dit traject nog aan de OLA-scheepvaarteis voldoen (zie Tabel 5-2).



Het grootste onderhoudsbaggerwerk op de Waal wordt uitgevoerd op Waaltraject 2 (tussen het splitsingspunt en de rivierbocht bij Nijmegen km 867-887). Het beoogde doel van het onderhoudsbaggerwerk is een verbetering van de bevaarbaarheid te bewerkstelligen. In tegenstelling tot dit zien we juist een afname van de bevaarbaarheid. De kansverdeling in Figuur 5-6 verschuift naar links en de kans op een waterdiepte kleiner dan 2,8 m bij afvoeren groter dan de OLA neemt toe van 7,1% naar 9,8%. Deze verslechtering kan als volgt worden verklaard:

- de methodiek ter bepaling van het onderhoudsbagger- en stortwerk die in het onderzoek wordt toegepast (zie 2.5) is een locatie-gerichte benadering. Zo kan het baggervolume dat op een bepaalde locatie wordt gebaggerd, direct bovenstrooms van een andere probleemlocatie (of bijna-probleemlocatie) worden teruggestort. Dit teruggestorte volume kan direct voor een nieuw scheepvaartprobleem zorgen. Figuur 5-8a en b laat de verschuiving van de locaties waarop de maatgevende waterdiepte wordt voorspeld zien. De kans op een maatgevende waterdiepte op de locaties tussen km 866-870 (bovenstrooms en benedenstrooms van het splitsingspunt) neemt toe. Hieruit wordt duidelijk dat het terugstorten van sediment op het traject km 862 - 867 voor extra problemen op het bovenstroomse deel van Waaltraject 2 zorgt.
- Als gevolg van terugstorten bovenstrooms wordt als het ware een deel van het sedimenttransport in het systeem rondgepompt. Met een eenvoudige analytische evenwichtsbenadering (de Vries, 1984) kan bijvoorbeeld worden geschat dat het verhang tussen baggerlocatie en bovenstroomse terugstortlocatie wat toeneemt en de bijbehorende waterdiepte wat afneemt. Dit betekent dat in dit traject de bodem wat omhoog zal komen (gunstig voor tegengaan autonome bodemdaling), maar de beschikbare vaardiepte wat zal afnemen, hetgeen uiteraard ongewenst is.

Op de Waaltrajecten 3 en 4 wordt voor met name een vaardiepte groter dan 3,5 m een verbetering van de bevaarbaarheid voorspeld. De cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte verschuift voor beide trajecten voor de waterdiepte tussen de 4 en 6 m naar rechts. Echter, het onderhoudsbaggerwerk leidt er niet toe dat op deze trajecten aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan. Er wordt op Waaltraject 3 bij afvoeren groter dan de OLA zelfs een kleine toename van de kans op een waterdiepte kleiner dan 2,8 m voorspeld.

### IJssel

De bevaarbaarheid op alle IJsseltrajecten verbetert door de uitvoering van onderhoudsbaggerwerk. De cumulatieve kansverdelingen in Figuur 5-7 verschuiven naar links. De kansen op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,5 m bij afvoeren groter dan de OLA nemen af (zie Tabel 5-3). Echter het onderhoudsbaggerwerk leidt er niet toe dat op deze trajecten aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan.

Op IJsseltraject 1 neemt de bevaarbaarheid voor een vaardiepte groter dan 3,8 m iets af (zie verschuiving kansverdeling voor een waterdiepte groter dan 3,8 m naar links in Figuur 5-7 en Tabel 5-3). Een zelfde verklaring als voor Waaltraject 2 geldt voor dit IJsseltraject. De kans op een maatgevende waterdiepte neemt ter plaatse van het splitsingspunt de IJsselkop toe (zie Figuur 5-8c).

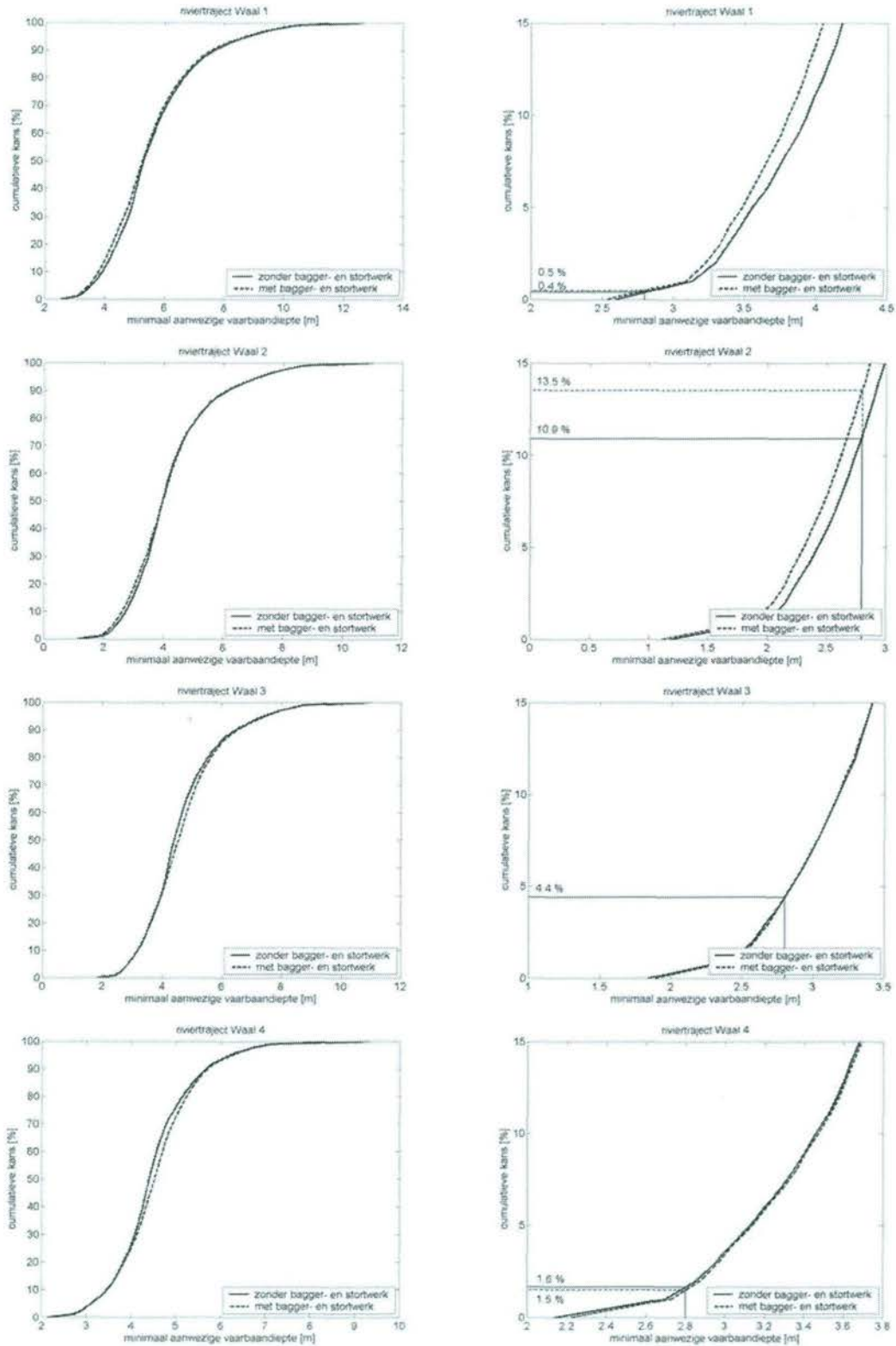
	Waal 1		Waal 2		Waal 3		Waal 4	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
<b>alle Q</b>								
$d_v < 2,8$ m	0,4	0,5	10,9	13,5	4,4	4,4	1,6	1,5
$d_v < 4$ m	11,3	13,9	51,5	50,7	31,1	30,7	26,4	25,3
<b>Q &gt; OLA</b>								
$d_v < 2,8$ m	0	0	7,1	9,8	1,5	3,9	0,5	0,5

Tabel 5-2: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,8 m en 4 m per Waaltraject voor de uitgangssituatie voor alle afvoeren en afvoeren groter dan de OLA, voor de situatie zonder en met baggerwerk.

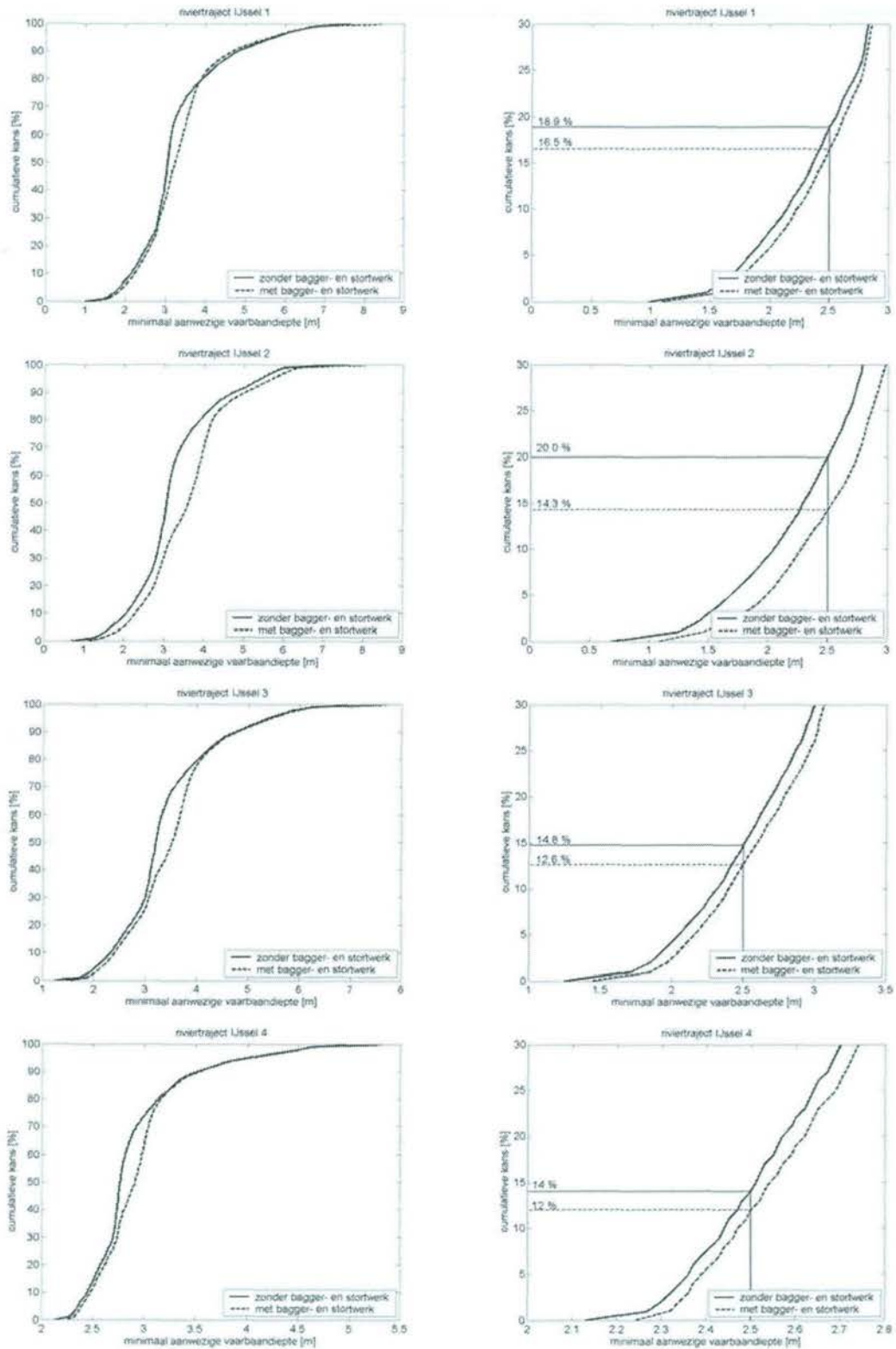
	IJssel 1		IJssel 2		IJssel 3		IJssel 4	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
<b>alle Q</b>								
d <sub>v</sub> < 2,5 m	18.9	16.5	20.0	14.3	14.8	12.6	14.0	12.0
d <sub>v</sub> < 4 m	81.1	82.5	81.6	70.6	79.7	78.0	95.0	94.8
<b>Q &gt; OLA</b>								
d <sub>v</sub> < 2,5 m	15.3	12.9	16.5	10.5	11.1	8.8	11	8

Tabel 5-3: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,5 m en 4 m per IJsseltraject voor de uitgangssituatie voor alle afvoeren en afvoeren groter dan de OLA.



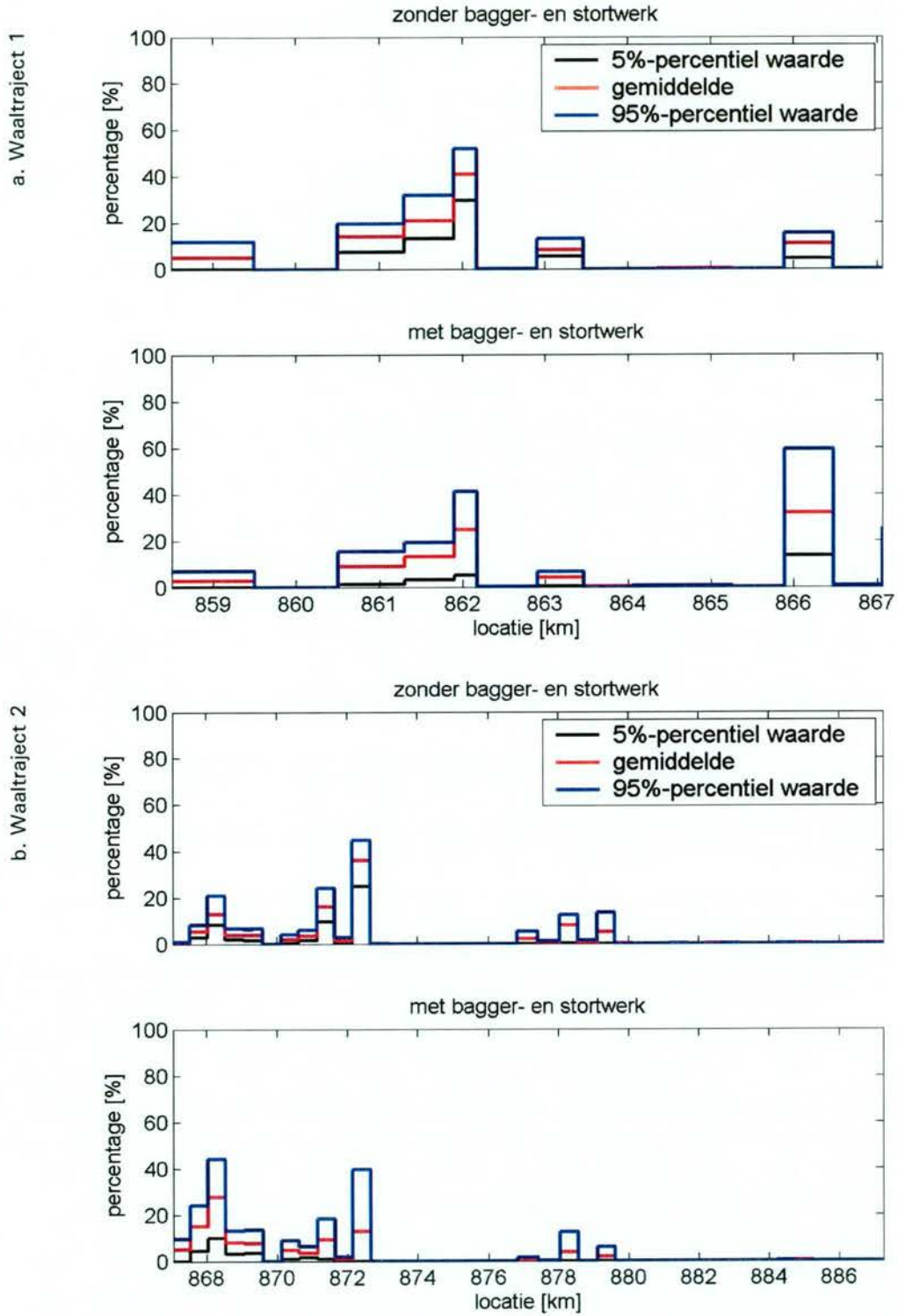


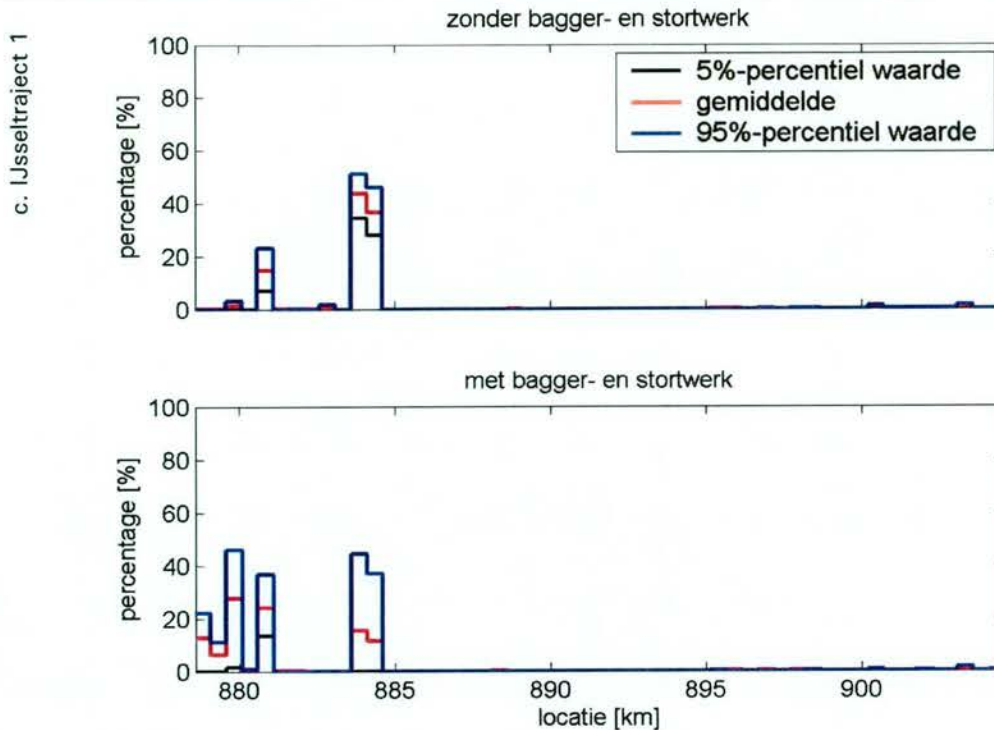
Figuur 5-6. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte per riviertraject op de Bovenrijn en Waal voor alle afvoeren voor de uitgangssituatie met en zonder onderhoudsbaggerwerk.



Figuur 5-7. cumulatieve kansverdelingfunctie van de maatgevende waterdiepte per riviertraject op de IJssel voor alle afvoeren voor de uitgangssituatie met en zonder onderhoudsbaggerwerk.







Figuur 5-8. statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte zich op locatie x bevindt voor riviertraject (a) Waaltraject 1, (b) Waaltraject 2 en (c) IJsseltraject 1 in de uitgangssituatie zonder onderhoudsbaggerwerk (bovenste panel in figuur) en met onderhoudsbaggerwerk (onderste panel in figuur).

### 5.3 RvdR-basisalternatieven

#### 5.3.1 Onderhoudsbaggerwerk

Het onderhoudsbaggerwerk als gevolg van de rivierverruimende maatregelen in de RvdR-basisalternatieven is weergegeven in Figuur 5-9 - Figuur 5-11. Het onderhoudsbagger- en stortwerk is per rivierlocatie in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel voor de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), het budgetalternatief (middelste panel in figuur) en het ruimtelijke alternatief (onderste panel in figuur) weergegeven in Figuur 5-9. De volumes per riviertraject staan in Figuur 5-10.

De cumulatieve kansverdelingen van het totale baggervolume per riviertraject, in Figuur 5-11, geven de cumulatieve kans op een volume kleiner dan een bepaald baggervolume voor (1) de uitgangssituatie, (2) het budgetalternatief en (3) het ruimtelijke alternatief. Een verschuiving van de cumulatieve kansverdeling naar links betekent een afname van het onderhoudsbaggerwerk. Een verschuiving naar rechts geeft aan dat het onderhoudsbaggerwerk toeneemt. Aangezien op Waaltraject 1 geen baggerwerk wordt uitgevoerd, is de cumulatieve kansverdeling een verticale lijn. Ook op riviertraject Waal 3 en 4 is de kans aanwezig dat er geen baggerwerk wordt uitgevoerd. De cumulatieve kansverdelingen op deze trajecten verlopen gedeeltelijk verticaal.

#### Ruimtelijke basisalternatief

##### Waal

Op Waaltraject 4 neemt de bevaarbaarheid af als gevolg van de rivierverruimende maatregelen op het traject km 924-933. Ten opzichte van de uitgangssituatie wordt een toename van het onderhoudsbaggerwerk op dit traject voorspeld (zie Figuur 5-9a). Op de Waaltrajecten 2 en 3



neemt de bevaarbaarheid iets toe. Dit resulteert in een kleine afname van het onderhoudsbaggerwerk.

Op basis van de berekeningen met het SOBEKmodel wordt voor het ruimtelijke basisalternatief op de Bovenrijn en de Waal gemiddeld jaarlijks 19.700 m<sup>3</sup> gebaggerd. Het gemiddelde jaarlijkse baggervolume neemt ten opzichte van de uitgangssituatie met 8,8% toe. Het baggervolume varieert met een kans van 90% tussen 1.310 en 53.100 m<sup>3</sup>.

### *IJssel*

Een grote verbetering van de bevaarbaarheid op IJsseltraject 4, benedenstrooms van km 975, als gevolg van het verdiepen van het zomerbed met 1 m over een afstand van 25 km voor beide RvdR-alternatieven, leidt tot een afname van het onderhoudsbaggerwerk op dat traject. Op dit traject is onderhoudsbaggerwerk niet meer noodzakelijk. Door deze zomerbedverdieping in combinatie met de overige rivierverruimende maatregelen neemt de bevaarbaarheid op de IJssel bovenstrooms van de zomerbedverdieping af. Hierdoor wordt daar een toename van het onderhoudsbaggerwerk voorspeld.

Op basis van de berekeningen met het SOBEKmodel wordt voor het ruimtelijke basisalternatief op de IJssel gemiddeld jaarlijks 57.900 m<sup>3</sup> gebaggerd. Het gemiddelde jaarlijkse baggervolume neemt ten opzichte van de uitgangssituatie met 12,2% toe. Het baggervolume varieert met een kans van 90% tussen 28.700 en 102.400 m<sup>3</sup>.

## **Budget basisalternatief**

### *Waal*

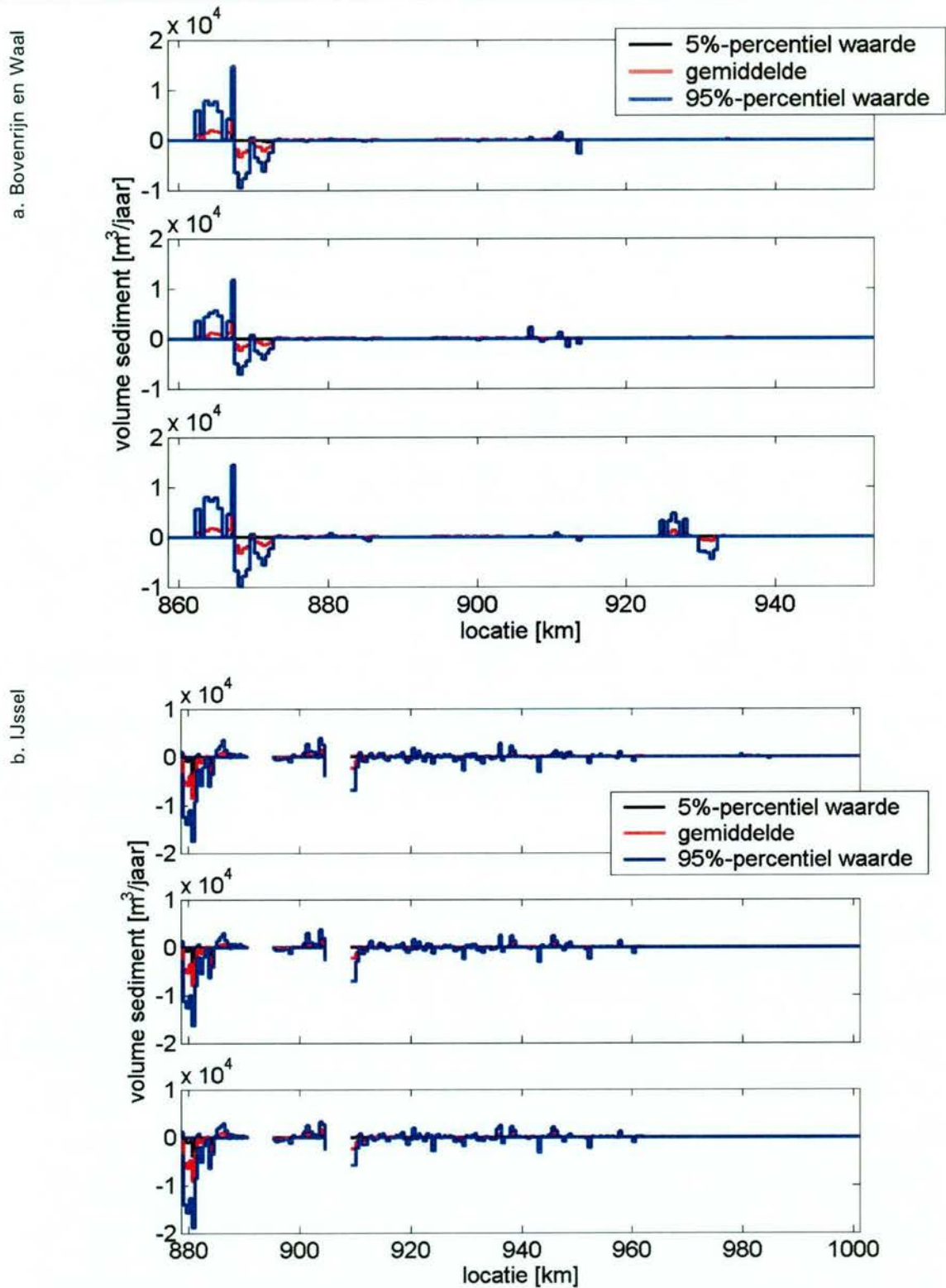
Dit RvdR-alternatief resulteert in een verbetering van de bevaarbaarheid op Waaltraject 2 en een kleine verslechtering op Waaltraject 3. Dit heeft een afname respectievelijk kleine toename van het onderhoudsbaggerwerk op die trajecten tot gevolg. Op de andere Waaltrajecten worden geen veranderingen in onderhoudsbaggerwerk gevonden.

Op de gehele Bovenrijn en de Waal neemt het gemiddeld jaarlijks baggervolume dat voor het budgetalternatief voorspeld is, af naar 12.200 m<sup>3</sup>. Dit is een afname van 32,6%. Het baggervolume varieert met een kans van 90% tussen 860 en 33.100 m<sup>3</sup>.

### *IJssel*

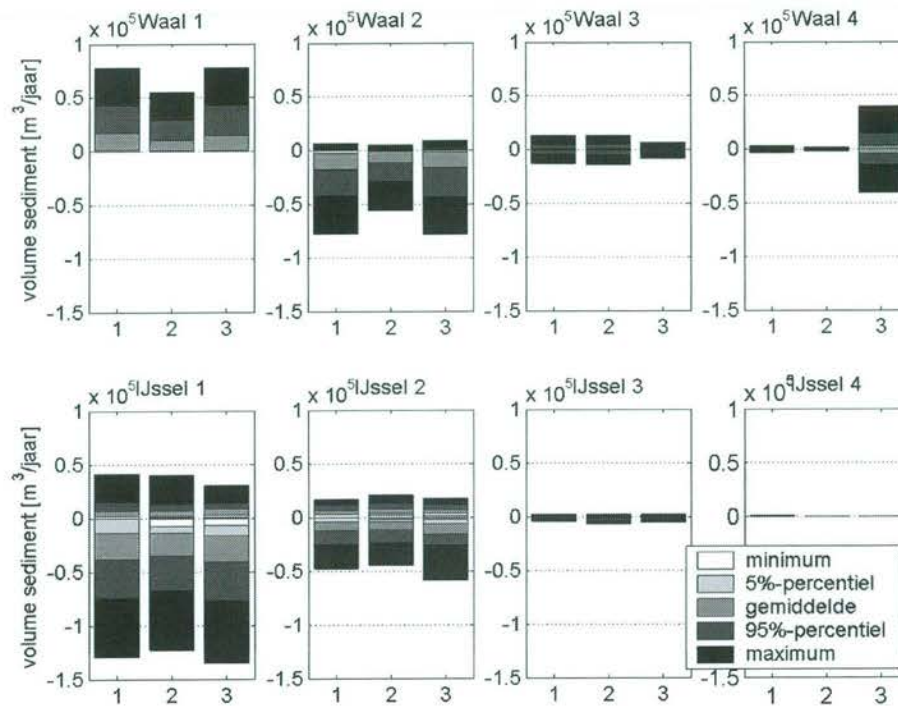
De gevolgen van de ruimtelijke maatregelen in het budgetalternatief voor de scheepvaart op de IJssel zijn vergelijkbaar met die van het ruimtelijke alternatief. Het onderhoudsbaggerwerk op IJsseltraject 4 reduceert naar nul. Voor het budgetalternatief werken de effecten van de RvdR-ingrepen minder ver in bovenstroomse richting door. Op IJsseltraject 3 neemt het onderhoudsbaggerwerk toe. Op de overige trajecten blijft het onderhoudsbaggerwerk min of meer constant.

Op basis van de berekeningen met het SOBEKmodel wordt voor het budgetalternatief op de IJssel gemiddeld jaarlijks 49.200 m<sup>3</sup> gebaggerd. Het gemiddelde jaarlijkse baggervolume neemt ten opzichte van de uitgangssituatie met 4,7% af. Het baggervolume varieert met een kans van 90% tussen 23.100 en 91.800 m<sup>3</sup>.



Figuur 5-9. De statistische karakteristieken van het bagger- en stortvolume per rivierlocatie voor de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur) voor de (a) Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel (negatieve waarde duidt op een baggervolume, positieve waarde duidt op een stortvolume).





*Figuur 5-10. statistische karakteristieken van het bagger- en stortvolume per riviertraject voor (1) de uitgangssituatie, (2) het budgetalternatief en (3) het ruimtelijke alternatief voor de (a) Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel (negatieve waarde duidt op een baggervolume, positieve waarde duidt op een stortvolume).*

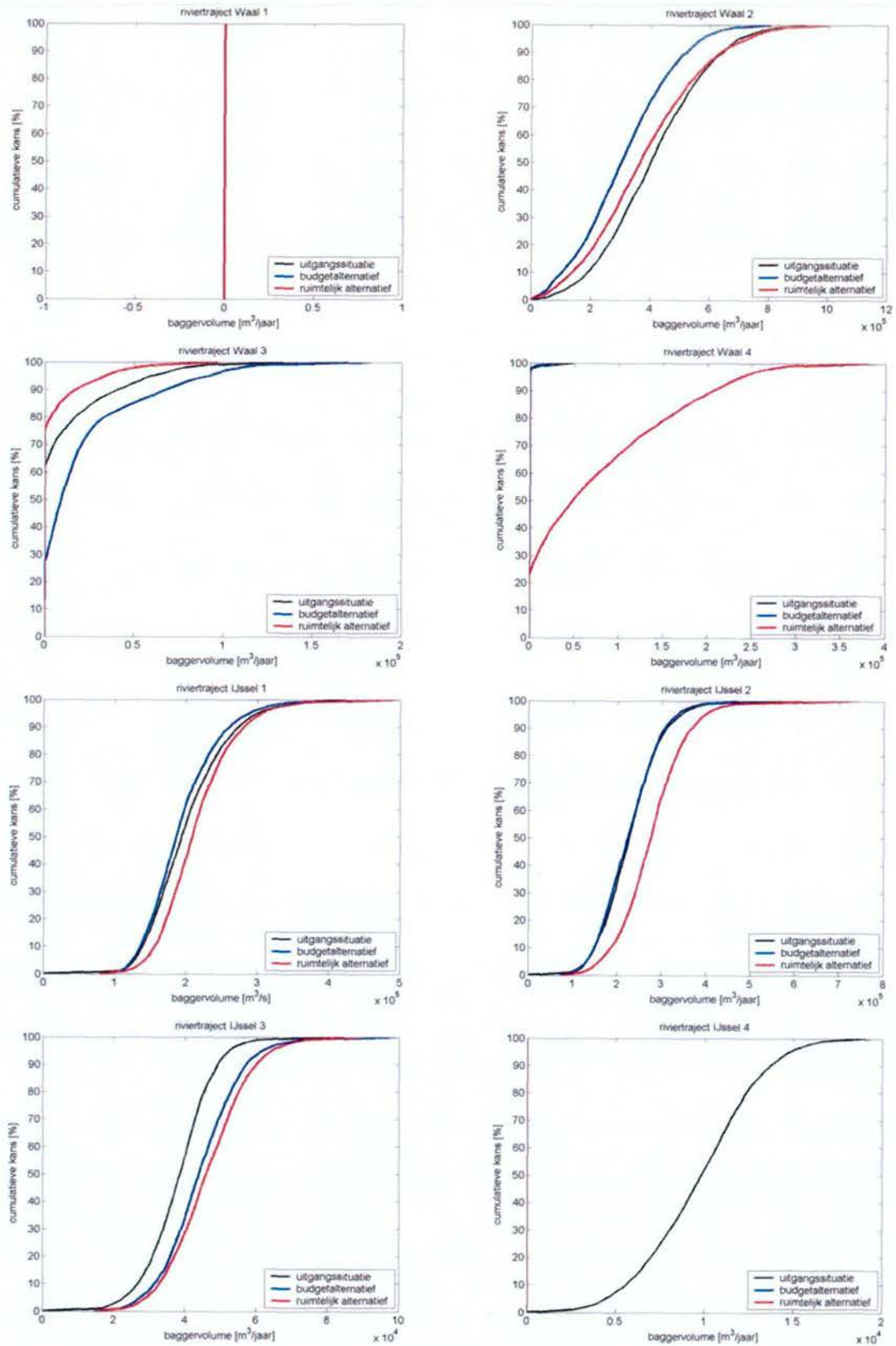
Storten								
Storten	Waal 1	Waal 2	Waal 3	Waal 4	IJssel 1	IJssel 2	IJssel 3	IJssel 4
95%-percentiel - 1	42110	1850	3940	0	14930	11440	1350	320
95%-percentiel - 2	28890	1840	5056	0	13120	13280	1360	0
95%-percentiel - 3	42360	2640	1290	14650	14460	11600	1300	0
gemiddelde - 1	16830	700	570	10	7260	5960	580	150
gemiddelde - 2	10660	690	880	5	6570	7270	520	0
gemiddelde - 3	15000	960	190	3570	8170	6830	530	0
5%-percentiel - 1	1610	0	0	0	1910	2970	20	30
5%-percentiel - 2	540	0	0	0	1650	3940	0	0
5%-percentiel - 3	840	0	0	0	2910	3820	10	0

Baggeren								
Baggeren	Waal 1	Waal 2	Waal 3	Waal 4	IJssel 1	IJssel 2	IJssel 3	IJssel 4
95%-percentiel - 1	0	42290	3940	0	74980	25170	2100	320
95%-percentiel - 2	0	29410	5060	0	67450	23440	3330	0
95%-percentiel - 3	0	43310	1470	14650	76730	26150	3050	0
gemiddelde - 1	0	17520	570	10	38100	12100	1290	150
gemiddelde - 2	0	11350	880	5	35300	11890	2010	0
gemiddelde - 3	0	15880	210	3570	40570	15410	1960	0
5%-percentiel - 1	0	2140	0	0	14510	4460	650	30
5%-percentiel - 2	0	850	0	0	14270	4460	1050	0
5%-percentiel - 3	0	1230	0	0	16840	6360	1120	0

Tabel 5-4: statistieken bagger- en stortvolumes per riviertraject

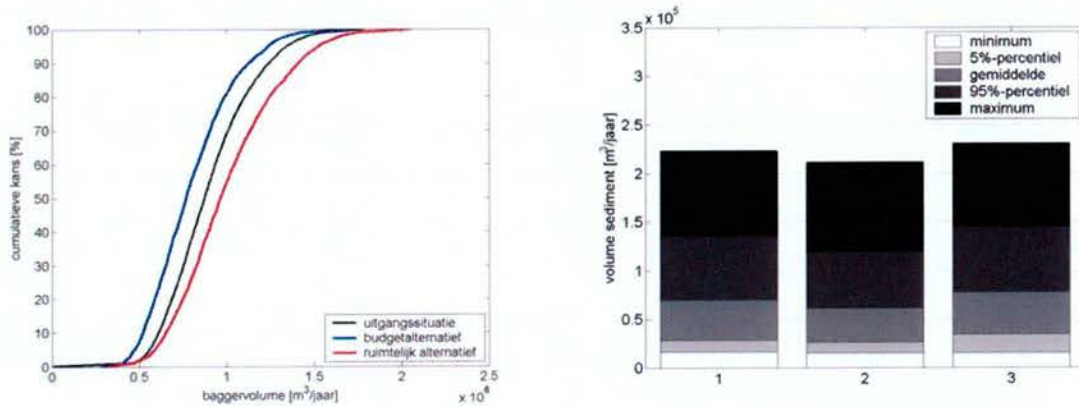




Figuur 5-11. cumulatieve kansverdeling van de baggervolumes per riviertraject voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief.

### Totaal onderhoudsbaggerwerk op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel

Figuur 5-12 laat het effect van de rivierverruimende maatregelen op het totale onderhoudsbaggerwerk in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel zien. De cumulatieve kansverdeling voor het totale onderhoudsbaggerwerk voor het budgetalternatief verschuift naar links en voor het ruimtelijke alternatief verschuift naar rechts. Ten opzichte van de uitgangssituatie neemt het gemiddelde jaarlijks onderhoudsbaggerwerk op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel voor het ruimtelijk alternatief met 11,2% toe naar 77.600 m<sup>3</sup>. Voor het budgetalternatief neemt het gemiddelde jaarlijks onderhoudsbaggerwerk met 12,0% af naar 61.400 m<sup>3</sup>.



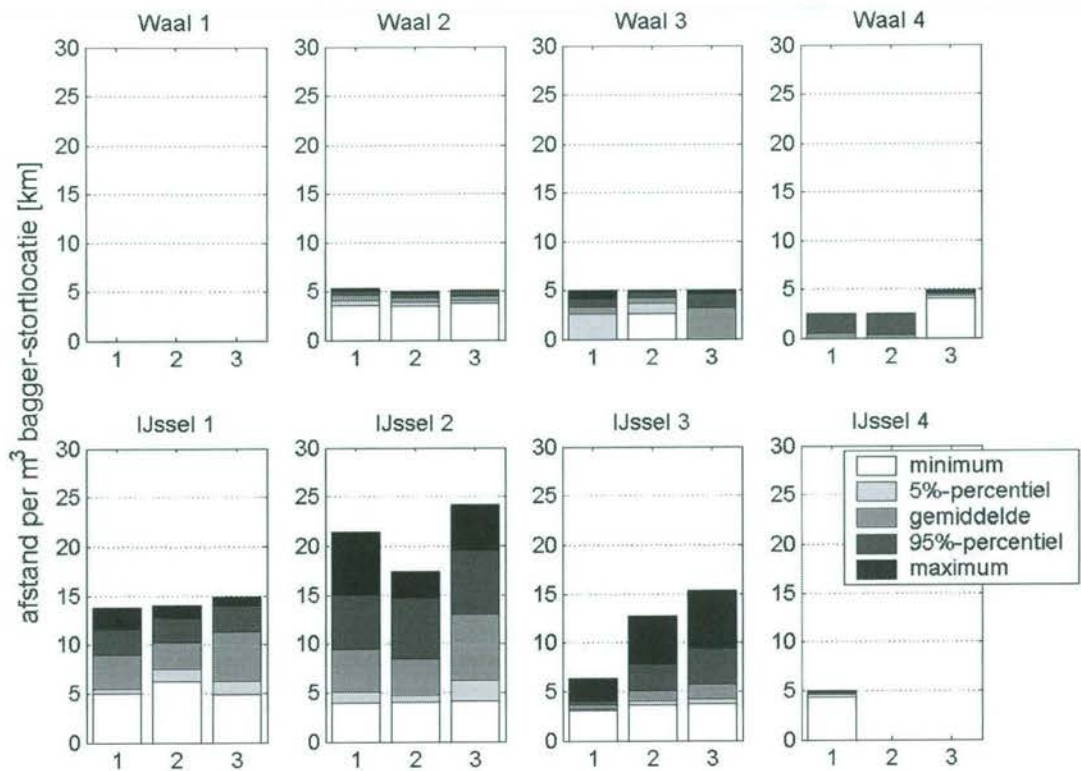
	(1) uitgangssituatie		(2) budgetalternatief		(3) ruimtelijke alternatief	
	volume [m <sup>3</sup> ]	volume [m <sup>3</sup> ]	Δ t.o.v. uitgangssituatie [%]	volume [m <sup>3</sup> ]	Δ t.o.v. uitgangssituatie [%]	
maximum	223500	211300	-5,4	230200	+3,0	
95%-percentiel	135900	119200	-12,3	144700	+6,5	
gemiddelde	69800	61400	-12,0	77600	+11,2	
5%-percentiel	28400	26000	-8,3	34300	+20,7	
minimum	16500	15200	-7,8	15000	-8,9	

Figuur 5-12. (a) de cumulatieve kansverdeling van het totale baggervolume op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel voor de uitgangssituatie (1), het budgetalternatief (2) en het ruimtelijke alternatief (3).

### Afstand tussen bagger- en stortlocatie

Figuur 5-13 geeft de afstand tussen bagger- en stortlocaties voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijk alternatief. Deze afstand neemt voor het ruimtelijke alternatief voor Waaltraject 4 toe als gevolg van de toename in onderhoudsbaggerwerk. Hetzelfde zien we op de IJsseltrajecten 2-3. Op IJsseltraject 4 wordt niet meer gebaggerd en reduceert de afstand dus naar 0. Voor het budgetalternatief wordt de afstand op Waaltraject 3, IJsseltrajecten 1 en 3 groter en op IJsseltrajecten 2 en 4 (afstand 0) kleiner.





Figuur 5-13. afstand tussen de baggerlocatie en de terugstortlocatie per riviertraject voor de (1) uitgangssituatie, (2) het budgetalternatief en (3) het ruimtelijke alternatief.

### 5.3.2 Effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid

Het onderhoudsbaggerwerk voor de RvdR-alternatieven heeft net als bij de uitgangssituatie als doel de bevaarbaarheid van de rivier te verbeteren, zodanig dat aan de OLA-diepte-eis wordt voldaan. Figuur 5-14, Figuur 5-15, Tabel 5-5 en Tabel 5-6 geven inzicht in de mate waarin door het onderhoudsbaggerwerk het beoogde doel wordt verwezenlijkt. Net als in de uitgangssituatie zien we dat de gehanteerde onderhoudsbaggerwerk-methode niet tot het beoogde effect leidt.

Om de baggervolumes voor de drie situaties te kunnen vergelijken is het echter tenminste gewenst dat de bevaarbaarheid voor de situaties vergelijkbaar is geworden door het baggerwerk.

#### Waal

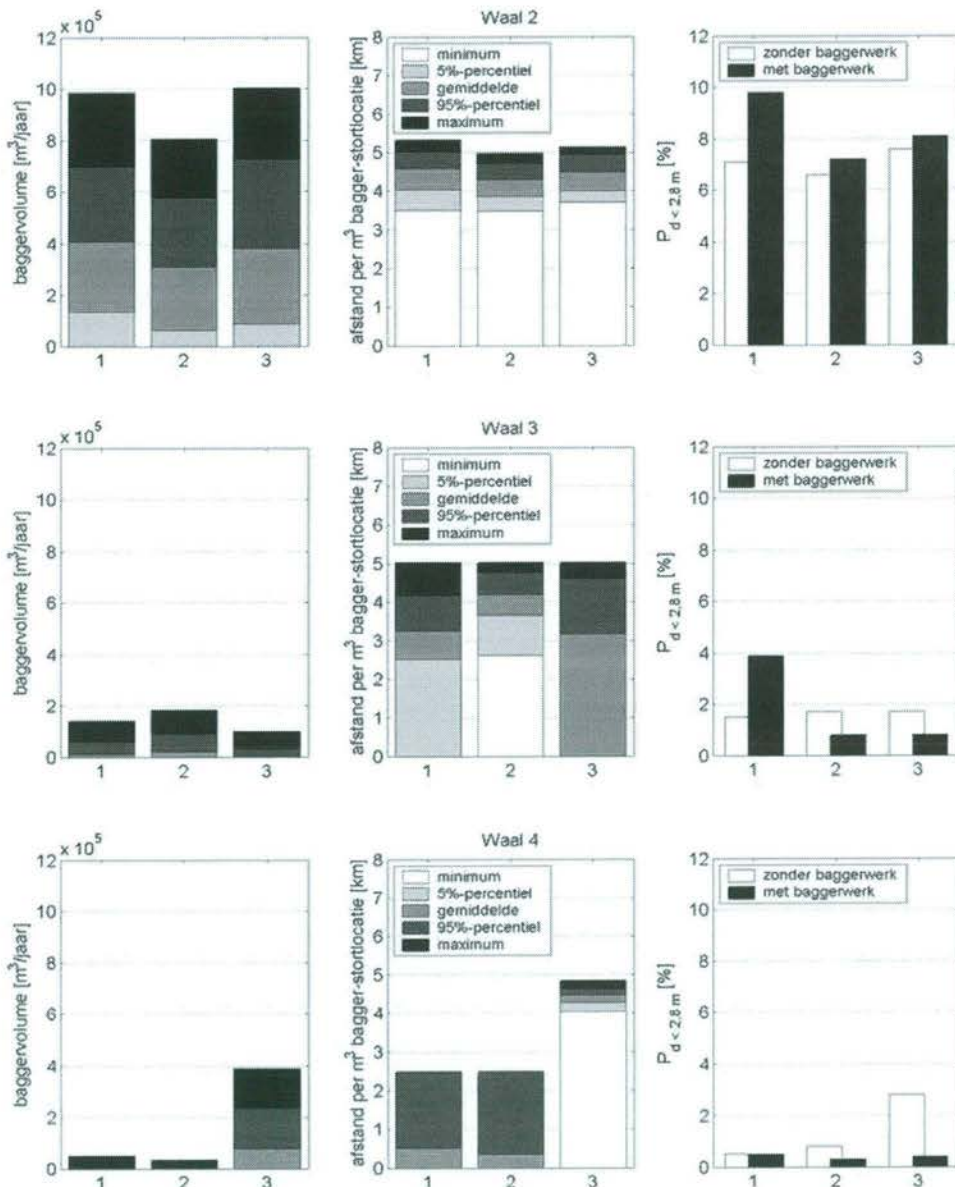
Voor beide RvdR-alternatieven neemt op Waaltraject 1 (de Bovenrijn) de bevaarbaarheid voor de situatie met ten opzichte van de situatie zonder onderhoudsbaggerwerk af (zie Tabel 5-5). Dit komt doordat sediment dat op benedenstroomse trajecten gebaggerd wordt, op dit traject wordt teruggestort. De kans op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,8 m bij afvoeren groter dan de OLA blijft net als in de uitgangssituatie gelijk aan nul. Voor Waaltraject 2 (tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen) neemt deze kans net als in de uitgangssituatie (en naar verwachting door dezelfde oorzaken) toe.

Op de benedenstroomse Waaltrajecten 3 en 4, reduceert deze kans ten opzichte van de situatie zonder baggerwerk en uitgangssituatie met baggerwerk. Echter, er wordt niet volledig aan de OLA-scheepvaarteis voldaan. Het vereiste onderhoudsbaggerwerk voor het ruimtelijke alternatief op Waaltraject 4 is weliswaar groter, maar leidt tot scheepvaartcondities die vergelijkbaar zijn met de uitgangssituatie en het budgetalternatief.

De grootste verbetering van de bevaarbaarheid in de Waaltrajecten 3 en 4 wordt bereikt voor grotere vaardiepten (zie Bijlage 5).

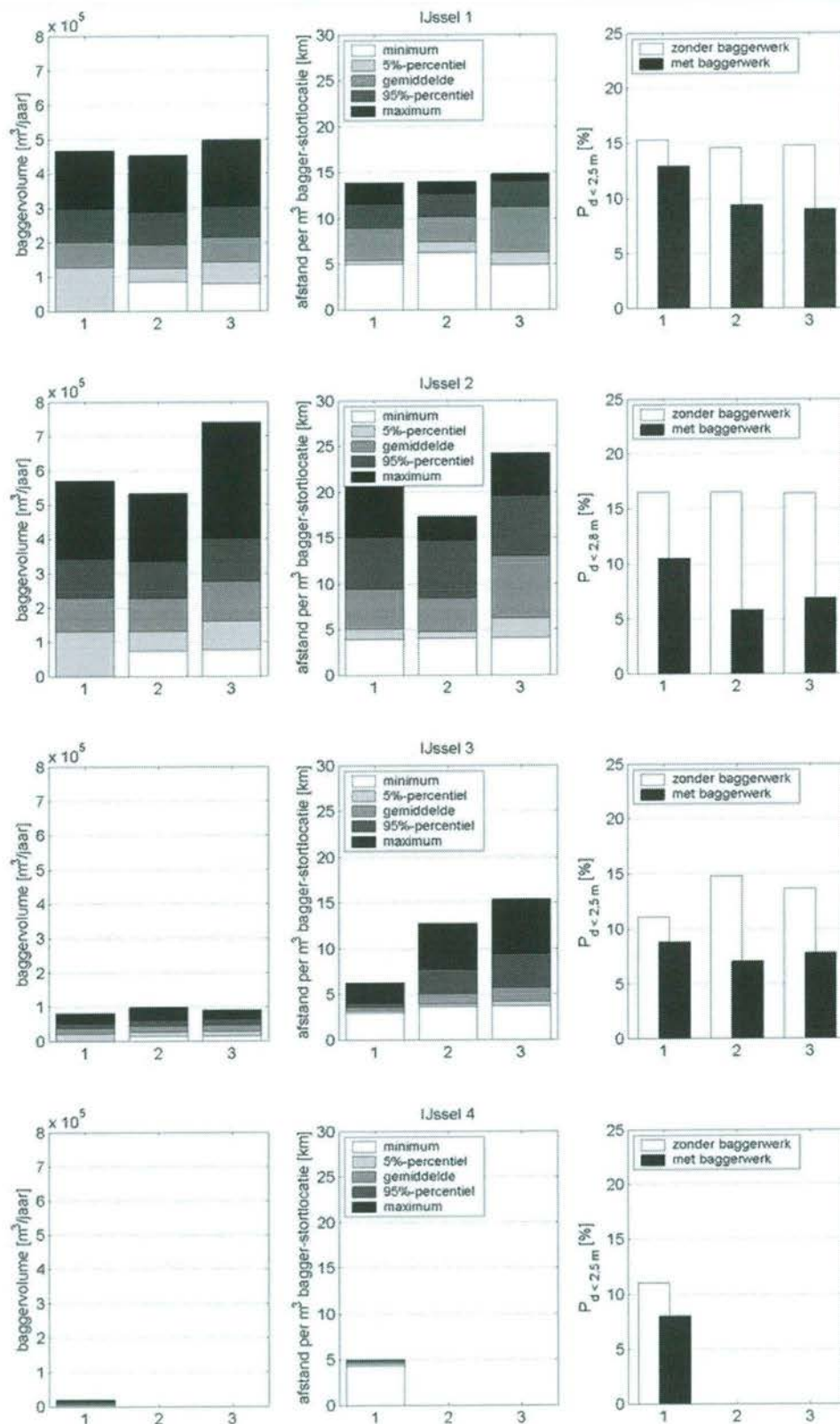
**IJssel**

De bevaarbaarheid op alle IJsseltrajecten verbetert door de uitvoering van onderhoudsbaggerwerk op vergelijkbare wijze als in de uitgangssituatie. De kansen op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,5 m bij afvoeren groter dan de OLA nemen af. Echter, het onderhoudsbaggerwerk leidt er niet toe dat op deze trajecten aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan. Om deze verbetering te realiseren is voor het ruimtelijke alternatief het totaal vereiste onderhoudsbaggerwerk op de IJssel echter wel groter. Voor het budgetalternatief geldt dat het onderhoudsbaggerwerk op traject 3 groter wordt, maar op de overige trajecten afneemt. Om een vergelijkbare verbetering van de scheepvaartcondities te realiseren neemt het totaal vereiste baggerwerk op de IJssel voor het budgetalternatief af ten opzichte van de uitgangssituatie.



**Figuur 5-14.** statistische karakteristieken van (a) het baggervolume, (b) de afstand per  $m^3$  tussen bagger-stortlocatie en (c) de kans op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,8 m met en zonder het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk in (1) de uitgangssituatie, (2) het budgetalternatief en (3) het ruimtelijke alternatief op de Bovenrijn en de Waal (Waaltraject 1 ontbreekt, aangezien op dit traject geen onderhoudsbaggerwerk is vereist en er altijd aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan).





Figuur 5-15. statistische karakteristieken van (a) het baggervolume, (b) de afstand per m<sup>3</sup> tussen bagger-stortlocatie en (c) de kans op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,8 m met en zonder het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk in (1) de uitgangssituatie, (2) het budgetalternatief en (3) het ruimtelijke alternatief op de IJssel.

	Waal 1		Waal 2		Waal 3		Waal 4	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
<b>alle Q</b>								
d <sub>v</sub> < 2,8 m								
uitgangssit.	0.4	<b>0.5</b>	10.9	<b>13.5</b>	4.4	4.4	1.6	<b>0.7</b>
budget alt.	0.4	<b>0.5</b>	11.5	<b>13.1</b>	4.8	<b>4.6</b>	2.3	<b>0.7</b>
ruimtelijk alt.	0.4	0.4	10.5	<b>12.2</b>	5	<b>4.9</b>	5.9	<b>0.6</b>
d <sub>v</sub> < 4 m								
uitgangssit.	11.3	<b>13.9</b>	51.5	<b>50.7</b>	31.1	<b>30.7</b>	26.4	<b>25.3</b>
budget alt.	11.3	<b>13.6</b>	49.8	<b>46.7</b>	35.6	<b>34.1</b>	27.0	<b>25.5</b>
ruimtelijk alt.	11.1	<b>14.4</b>	41.2	<b>48.0</b>	32.5	<b>33.6</b>	55.5	<b>26.8</b>
<b>Q &gt; OLA</b>								
d <sub>v</sub> < 2,8 m								
uitgangssit.	0	0	7.1	<b>9.8</b>	1.5	<b>3.9</b>	0.5	0.5
budget alt.	0	0	6.6	<b>7.2</b>	1.7	<b>0.8</b>	0.8	<b>0.3</b>
ruimtelijk alt.	0	0	7.6	<b>8.1</b>	1.7	<b>0.8</b>	2.8	<b>0.4</b>

Tabel 5-5: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,8 en 4 m per Waaltraject voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief.

	IJssel 1		IJssel 2		IJssel 3		IJssel 4	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
<b>alle Q</b>								
d <sub>v</sub> < 2,5 m								
uitgangssit.	18.9	<b>16.5</b>	20.0	<b>14.3</b>	14.8	<b>12.6</b>	14	<b>12</b>
budget alt.	18.5	<b>14.3</b>	20.1	<b>10.9</b>	18.5	<b>12.1</b>	0	0
ruimtelijk alt.	18.3	<b>14</b>	20.0	<b>12.1</b>	17.2	<b>12.8</b>	0	0
d <sub>v</sub> < 4 m								
uitgangssit.	81.1	<b>82.5</b>	81.6	<b>70.6</b>	79.7	<b>78</b>	95	<b>94.8</b>
budget alt.	81.2	<b>80</b>	84	<b>63.1</b>	86.2	<b>83.6</b>	90.4	<b>89</b>
ruimtelijk alt.	82.2	<b>82.7</b>	82.7	<b>66.1</b>	84.7	<b>82.9</b>	89.4	<b>88.5</b>
<b>Q &gt; OLA</b>								
d <sub>v</sub> < 2,5 m								
uitgangssit.	15.3	<b>12.9</b>	16.5	<b>10.5</b>	11.1	<b>8.8</b>	11	<b>8</b>
budget alt.	14.6	<b>9.4</b>	16.5	<b>5.8</b>	14.8	<b>7.1</b>	0	0
ruimtelijk alt.	14.8	<b>9.0</b>	16.4	<b>6.9</b>	13.6	<b>7.8</b>	0	0

Tabel 5-6: onderschrijdingskans van waterdiepte kleiner dan 2,5 en 4 m per IJsseltraject voor de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief.

## 5.4 Conclusies

### Baggerwerk

Het beoogde doel van het onderhoudsbaggerwerk en de wijze waarop dit in de Monte Carlo simulatie online is verwerkt, is tot een verbetering van de bevaarbaarheid op de Rijntakken te komen, zodanig dat in de situatie met baggeren aan de OLA-scheepvaartseisen wordt voldaan. In bovenstaande analyse is een vergelijking gemaakt tussen de vereiste baggervolumes voor de uitgangssituatie en de RvdR-alternatieven en de mate waarin de beoogde verbetering van de scheepvaart-condities wordt gerealiseerd.



Uit de resultaten blijkt dat het onderhoudsbaggerwerk met name vereist is op locaties waarop frequent de maatgevende waterdiepte in de vaargeul wordt voorspeld. Voor de Waal betreft dit het gebied tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen. Voor de IJssel wordt het grootste onderhoudsbaggerwerk voorspeld op het bochtige bovenstroomse traject. Het vereiste onderhoudsbaggerwerk op de IJssel neemt in benedenstroomse richting af.

In de uitgangssituatie is het berekende gemiddelde jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel gelijk aan 69.800 m<sup>3</sup>. Ten opzichte van de uitgangssituatie neemt het gemiddelde jaarlijks onderhoudsbaggerwerk voor het ruimtelijk alternatief met 11,2% toe naar 77.600 m<sup>3</sup>. Voor het budgetalternatief neemt het gemiddelde jaarlijks onderhoudsbaggerwerk met 12,0% af naar 61.400 m<sup>3</sup>.

Voor de bandbreedte van het baggerwerk (90% betrouwbaarheidsinterval) geldt iets vergelijkbaars. De bandbreedtes voor de uitgangssituatie (107.500 = 135.900 - 28.400 m<sup>3</sup>/jaar) is 13,3% groter dan voor het budget basisalternatief (93.200 = 119.200 - 26.000 m<sup>3</sup>/jaar) en slechts 2,7% kleiner dan voor het ruimtelijk basisalternatief (110.400 = 144.700 - 34.300 m<sup>3</sup>/jaar).

Minimale en maximale baggervolumes per jaar verschillen niet veel voor de drie situaties.

### Transportafstand

De afstand tussen bagger- en stortlocatie is op de Bovenrijn en de Waal significant kleiner dan op de IJssel. Op de IJssel wordt sediment frequent bovenstrooms van het beoogde terugstorttraject van 1,5 - 5 km bovenstrooms van de baggerlocatie teruggestort in de rivier. Op met name het bovenstroomse traject op de IJssel doen scheepvaartproblemen zich vrijwel op alle rivierlocaties voor. Er is dan geen ruimte binnen het eigen riviertraject waardoor het sediment verder bovenstrooms, op het Pannerdens Kanaal en incidenteel op de Bovenrijn, moet worden gestort. De verschillen in transportafstand tussen uitgangssituatie en basisalternatieven zijn niet heel groot (Figuur 5-13).

### Bevaarbaarheid

De gehanteerde methodiek leidt voor zowel de uitgangssituatie als de RvdR-alternatieven beslist niet altijd tot het beoogde scheepvaart-effect. Op sommige trajecten wordt de bevaarbaarheid zelfs slechter. Dit kan voor een belangrijk deel worden verklaard door de beperking van het gebruik van een 1D-model, waardoor over de gehele sedimenttransporterende breedte moet worden gebaggerd. Om zeer grote (en onrealistische) baggervolumes te voorkomen is het baggeren van overdiepte buiten beschouwing gelaten. Dit betekent wel, dat indien na baggeren enige morfologische verandering optreedt, de bevaarbaarheid onmiddellijk weer onvoldoende is.

In het algemeen kan worden gesteld, dat op de Waaltrajecten 1 en 2 de bevaarbaarheid als gevolg van onderhoudsbaggerwerk afneemt. Voor Waaltraject 1 is deze afname makkelijk te verklaren. Op dit traject wordt in de situatie zonder baggeren ruimschoots aan de OLA-scheepvaarteis voldaan. Er is voldoende overdiepte aanwezig, waardoor in de situatie met baggerwerk dit Waaltraject als terugstorttraject dient. Het traject wordt minder goed bevaarbaar voor vaardiepten groter dan 3,5 m. Ondanks deze afname blijft het traject aan de OLA-scheepvaarteis voldoen.

Op Waaltraject 2 wordt de kans op het niet voldoen aan de OLA-scheepvaarteis groter door bagger- en stortwerk. De verslechtering is als volgt te verklaren:

- de methodiek ter bepaling van het onderhoudsbagger- en stortwerk die in het onderzoek wordt toegepast (zie paragraaf 2.5) is een locatie-gerichte benadering. Zo kan het baggervolume dat op een bepaalde locatie wordt gebaggerd, direct bovenstrooms van een andere probleemlocatie (of bijna-probleemlocatie) worden teruggestort. Dit teruggestorte volume kan direct voor een nieuw scheepvaartprobleem zorgen. Figuur 5-8a en b laat de verschuiving van de locaties waarop de maatgevende waterdiepte wordt voorspeld zien. De kans op een maatgevende waterdiepte op de locaties tussen km 866-870 (bovenstrooms en benedenstrooms van het splitsingspunt) neemt toe. Hieruit wordt



duidelijk dat het terugstorten van sediment op het traject km 862 - 867 voor extra problemen op het bovenstroomse deel van Waaltraject 2 zorgt.

- Als gevolg van terugstorten bovenstrooms wordt als het ware een deel van het sedimenttransport in het systeem rondgepompt. Met een eenvoudige analytische evenwichtsbenadering (de Vries, 1984) kan bijvoorbeeld worden geschat dat het verhang tussen baggerlocatie en bovenstroomse terugstortlocatie wat toeneemt en de bijbehorende waterdiepte wat afneemt. Dit betekent dat in dit traject de bodem wat omhoog zal komen (gunstig voor tegengaan autonome bodemdaling), maar de beschikbare vaardiepte wat zal afnemen, hetgeen uiteraard ongewenst is.

Op de Waaltrajecten 3 en 4 leidt onderhoudsbaggerwerk tot een kleine verbetering van de bevaarbaarheid. Echter, het onderhoudsbaggerwerk leidt er niet toe dat op deze trajecten volledig aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan. Voor alle drie de situaties geldt, dat de grootste verbetering van de bevaarbaarheid wordt bereikt bij de grotere vaardiepten (>3,5 m).

De bevaarbaarheid op alle IJsseltrajecten verbetert door de uitvoering van onderhoudsbaggerwerk. De kansen op een representatieve waterdiepte in de vaargeul kleiner dan 2,5 m bij afvoeren groter dan de OLA nemen af. Echter, het onderhoudsbaggerwerk leidt er niet toe dat op deze trajecten volledig aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan.

De effecten van het onderhoudsbaggerwerk op de scheepvaart-condities in de uitgangssituatie en voor de RvdR-alternatieven zijn ongeveer vergelijkbaar, al blijft de bevaarbaarheid in de uitgangssituatie wat achter bij die van de RvdR alternatieven op de trajecten Waal3, IJssel1, IJssel2 en IJssel4. Op dit laatste traject wordt dat eenvoudig verklaard door de zomerbedverdieping in de beide basisalternatieven. Om tot deze (beoogde) verbetering van de scheepvaart-condities te komen is het vereiste jaarlijkse onderhoudsbaggerwerk voor het ruimtelijk alternatief groter en voor het budgetalternatief kleiner dan in de uitgangssituatie. Doordat de bevaarbaarheid in de uitgangssituatie op enige trajecten wat achterblijft bij de basisalternatieven, zal het verschil in vereiste baggerhoeveelheden (uitgangssituatie t.o.v. basisalternatief) nog wat kleiner worden voor het ruimtelijk basisalternatief en nog wat groter worden voor het budget basisalternatief.



## 6 Overeenstemming van berekeningen met meetgegevens

### 6.1 Inleiding

Voor de uitgangssituatie is de onzekerheid in bodemvariabiliteit als functie van ruimte en tijd onderzocht door het uitvoeren van MCS met het Rijntakkenmodel (Hoofdstuk 3). Daarnaast zijn met behulp van de methodes ter bepaling van de bevaarbaarheid (Paragraaf 2.4) en het onderhoudsbaggerwerk (Paragraaf 2.5) ook de onzekerheden in de scheepvaartbeperkingen (Hoofdstuk 4) en het onderhoudsbaggerwerk (Hoofdstuk 5) bepaald. Vergelijking van deze stochastische resultaten met datgene dat we in de rivier waarnemen, geeft inzicht in de betrouwbaarheid van het rekenmodel en de methodieken. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een database met verschillende metingen in de Nederlandse Rijntakken, te weten:

- Jaarlijkse dwarsdoorsnede gemiddelde bodemliggingen per rivierkilometer langs alle Rijntakken vanaf 1926, die zijn afgeleid uit bodempeilingen (in de periode 1926-1960 is handmatige gepeild met een loodlijntje, vanaf 1960 zijn bodempeilingen uitgevoerd met akoestische echo-lodingen met single-beam methode).
- Minst Gepeilde Dieptes in de Bovenrijn en de Waal voor de periode 1993-2003.
- Jaarlijkse baggergegevens langs de Rijntakken in de periode 1900-2000.

De kwaliteit van deze gegevens is onder andere beïnvloed door een onvolledige registratie (leemtes in datasets) van de data, de postprocessing van de data, de meetfrequentie en de meettechniek. De homogeniteit van de dataset is aangetast door de structurele en incidentele ingrepen die in de loop der jaren hebben plaatsgevonden in het rivierengebied. Hierdoor kan de dataset vanuit statistisch oogpunt niet als een homogene dataset worden beschouwd. Bovendien geeft de dataset slechts één mogelijke situatie weer van datgene dat plaats had kunnen vinden. De riviercondities die optraden, zoals de afvoerhydrograaf, de bodemgolven, de korrelgrootteverdeling in de rivier, hebben er toe geleid dat de rivier zich op de waargenomen wijze heeft ontwikkeld, met bijbehorend onderhoudsbaggerwerk en scheepvaartbeperkingen. De metingen bevatten niet de ensemble dimensie van alle mogelijke situaties die op hadden kunnen treden, maar slechts één opgetreden situatie. Dit, in combinatie met een onvolledige registratie, de aanwezigheid van meetfouten en niet-homogeniteiten, maakt de vergelijking van de stochastische resultaten met metingen lastig. Tegelijkertijd is dit wel de enige toetsingsmogelijkheid.

In dit hoofdstuk wordt op basis van de metingen beoordeeld of de bandbreedte van gemeten en berekende bodemvariëaties vergelijkbaar zijn, of bandbreedtes van gemeten en berekende bevaarbaarheid overeenkomen, of locaties van Minst Gepeilde Dieptes (MGD's) door berekeningen worden gereproduceerd en of het berekende onderhoudsbaggerwerk vergelijkbaar is met het uitgevoerde baggerwerk.

### 6.2 Morfologische berekeningen en bodempeilingen

Uit de resultaten in Paragraaf 3.3 blijkt dat een stochastische benadering niet alleen laat zien dat een groot aantal hydraulische en morfologische situaties op kan treden. Het laat ook zien dat op sommige rivierlocaties de ruimtelijke en tijdsafhankelijke bodemvariëaties groter zijn dan op andere locaties. Met name op locaties met variatie in de riviergeometrie, zoals breedtevariatie en de aanwezigheid van rivierkundige constructies, worden significante ruimtelijke en tijdsafhankelijke patronen in de onzekerheden van de morfologische reactie voorspeld. Elke variatie in geometrie introduceert lokale verstoringen in waterbeweging en sedimenttransport. Daardoor worden bodemgolven gegenereerd. Dit leidt tot onzekere variaties in de bodemligging in tijd en plaats.

De onzekerheid in de bodemvoorspellingen voor de uitgangssituatie zoals deze bepaald is in Paragraaf 3.3, wordt veroorzaakt door de volgende bronnen:

- onzekerheid in lange-termijn trend - de aanpassing van de bodemhelling;
- inherente onzekerheid doordat de rivier als natuurlijk systeem onzeker is;
- systematische onzekerheid doordat de bodemligging op een bepaalde locatie kan worden beïnvloed door bodemgolven die op bovenstroomse locaties worden opgewekt en zich in benedenstroomse richting voortplanten;
- onzekerheden die geïntroduceerd zijn in het modelconcept (keuze 1D-model, modelleren sedimenttransport met een empirische formule, keuze uniform sediment, etc.).

De morfologische berekeningen van Paragraaf 3.3 zijn vergeleken met bodemmetingen. Hierbij is onder andere gekeken of op de locaties met de grootste voorspelde onzekerheid in de bodemligging ook de grootste bodemvariabiliteit is gemeten.

### **6.2.1 Jaarlijkse bodempeilingen, structurele en incidentele ingrepen in de rivier**

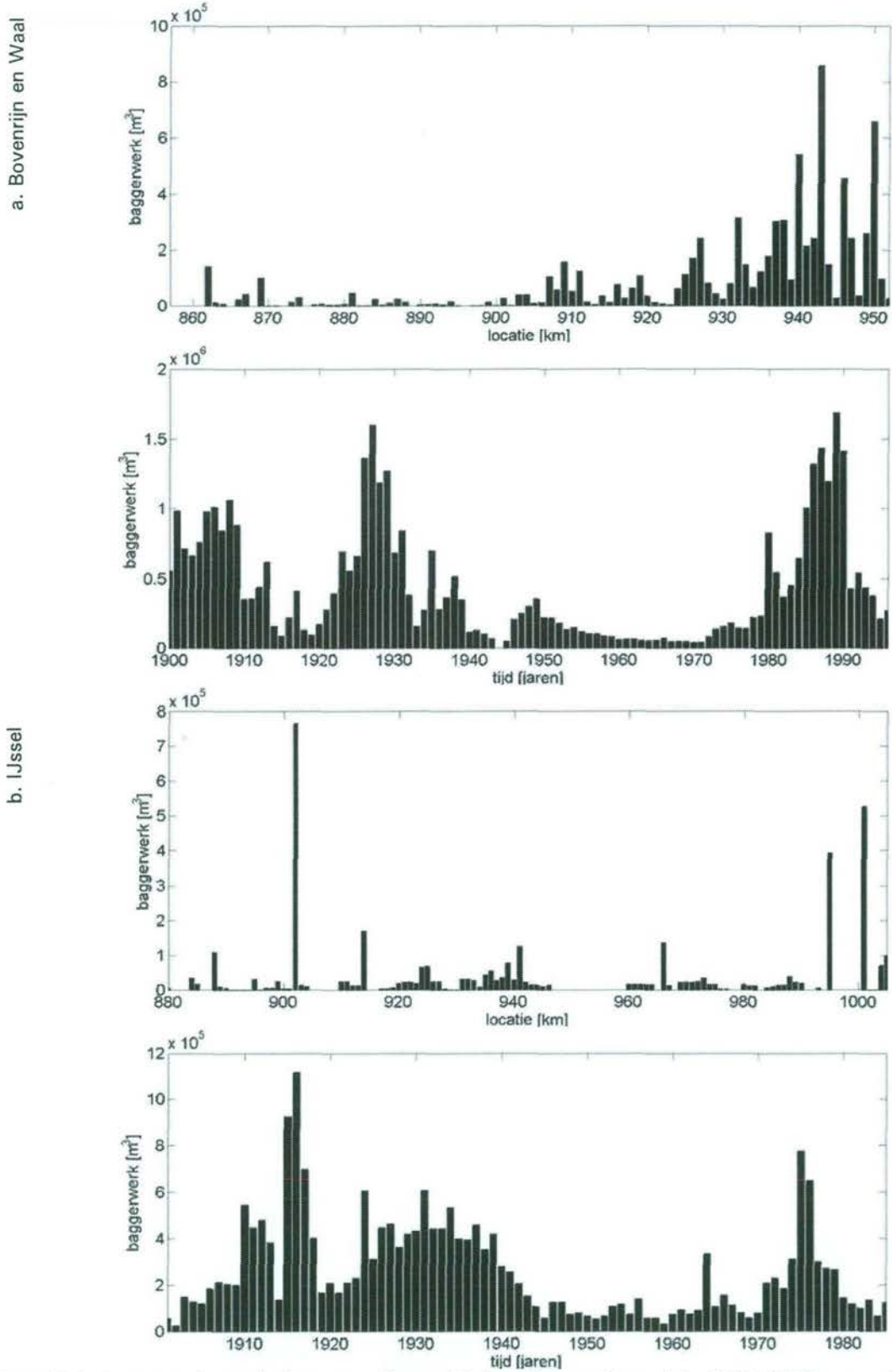
Vanaf 1926 zijn jaarlijks de dwarsdoorsnede gemiddelde bodemliggingen per rivierkilometer langs alle Rijntakken afgeleid uit bodempeilingen. De peilingen zijn jaarlijks uitgevoerd in de periode april tot november. Hierdoor hebben de metingen enigszins een seizoensbias. In de periode tot 1960 is handmatig gepeild met loodlijntjes. Vanaf 1960 zijn de metingen uitgevoerd met akoestische echo-lodingen. In de periode 1926 tot heden is de rivier beïnvloed door structurele en incidentele veranderingen in het systeem. Een structurele verandering kan een natuurlijke oorzaak hebben, zoals extreem hoogwater of kan het gevolg zijn van menselijk ingrijpen, zoals rivierregulering en kanalisatie. Onder incidentele veranderingen verstaan we bijvoorbeeld baggerwerkzaamheden. In Tabel 6-1 is een overzicht gegeven van de structurele ingrepen in het Rijn-systeem.



Structurele ingrepen in het Rijn-systeem	
<b>Duitse deel van de Rijntakken</b>	
1890 - 1970	Grootschalige rivierregulering, grootschalige mijnbouw en de constructie van stuwen in het Duitse deel van de Rijn resulteren in waterstandreductie en een reductie in sedimenttoevoer vanuit Duitsland.
<b>Alle Rijntakken</b>	
1850 - 1870	eerste fase van de rivierregulatie gerealiseerd. De loop van de rivier is vastgelegd door de aanleg van zomerdijken en kades.
1870 - 1890	tweede fase van de rivierregulatie gerealiseerd. De loop van de rivier is verder vastgelegd door de aanleg van kribben.
<b>Bovenrijn en Waal</b>	
1900 - 1916	afronden van de rivierregulatie door het vastleggen van de normaalbreedte op 340 m op de Bovenrijn en op 300 m benedenstrooms en 260 m bovenstrooms van Zaltbommel op de Waal.
1969	sluiting Haringvliet
1970	sluiting Volkerak
1885 - 1904	afscheiding tussen de Maas en de Waal.
1927	aanleg van het Maas-Waal kanaal.
1985 - 1988	aanleg vaste laag in de Waalbocht bij Nijmegen.
1996 - 1999	aanleg bodemkribben in de Waalbocht bij Erlecom.
1996 - 1999	aanleg vaste laag in de Waalbocht bij St. Andries.
<b>IJssel</b>	
1914 - 1932	afronden van de rivierregulatie door het vastleggen van de IJsselmonding en de afsluiting van de Zuiderzee.
1954	bochtafsnijding Doesburg met een lengtereductie van de rivier van 4,6 km.
1969	bochtafsnijding Rheden/De Steeg met een lengtereductie van de rivier van 4 km.

*Tabel 6-1: rivierkundige ingrepen in de Rijn in de periode tussen 1850 tot heden (Bron: Visser, 1999).*

Met betrekking tot de incidentele veranderingen in de rivier, de baggerwerkzaamheden, wordt een goede analyse beperkt door een onvolledige registratie van deze data. Vanaf het einde van de 19e eeuw vond baggerwerk ongecontroleerd plaats in de Rijn. Vanaf 1935 is de eerste regulatie doorgevoerd die licentiehouders toestemming gaf een bepaald volume sediment te baggeren. Het baggerwerk bleef toch redelijk ongecontroleerd en ongelimiteerd plaatsvinden. In 1974 werd een nieuwe wet opgesteld. Hierdoor reduceerde het totale baggerwerk. In 1991 is een nieuw beleid van kracht, dat stelt dat baggeren is toegestaan mits het gebaggerde sediment op een andere locatie in de rivier wordt teruggestort. Het geregistreerde baggerwerk is per rivierlocatie over de periode 1900-1996 en per jaar op de Bovenrijn, de Waal en de IJssel weergegeven in Figuur 6-1. Bij vergelijking tussen de volumes per locatie en volumes per jaar valt op dat de sommatie van de volumes per locatie ruim een factor 5 (Bovenrijn en Waal), respectievelijk bijna een factor 6 (IJssel) kleiner is dan de sommatie van de baggervolumes per jaar. Dit is het gevolg van hiaten in de registratie. Vaak zijn wel de totale baggervolumes geregistreerd, maar niet de precieze baggerlocaties.



Figuur 6-1. het geregistreerde baggerwerk per rivierlocatie over de periode 1900-1996 en per jaar op de riviertrajecten (a) de Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel (Bron: Cd-rom 'Bodemligging en baggergegevens 1900-2000', Rijkswaterstaat RIZA).

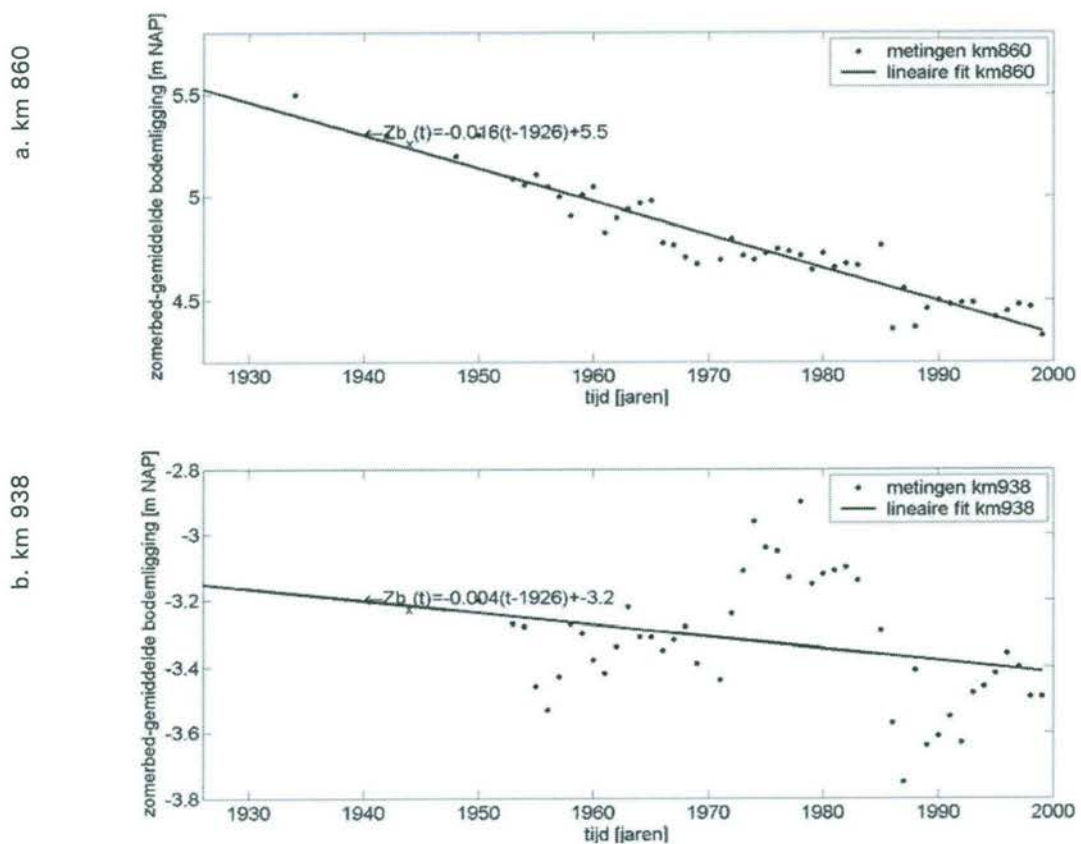


Als gevolg van de genoemde structurele en incidentele veranderingen zijn niet-homogeniteiten in de bodemdata geïntroduceerd. Het is onjuist om een statistische analyse toe te passen op de 'ruwe' dataset. Dit wordt duidelijker indien we de gemeten dwarsdoorsnede gemiddelde bodemligging per rivierlocatie  $z_i(t)$  als functie van de tijd uitzetten en beschrijven met een lineair verband:

$$z_i(t) = a_i \cdot t + b_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

Hierin is  $a_i$  de jaarlijkse bodemverandering,  $b_i$  de bodemligging op het begintijdstip en  $\varepsilon_i$  de normaal verdeelde variabele die de bodemvariatie ten opzichte van het lineaire verband beschrijft op locatie  $i$ .

Voor de locaties km 860 en km 938 op de Bovenrijn en de Waal zijn de dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemmetingen en de lineaire fit weergegeven in Figuur 6-2.

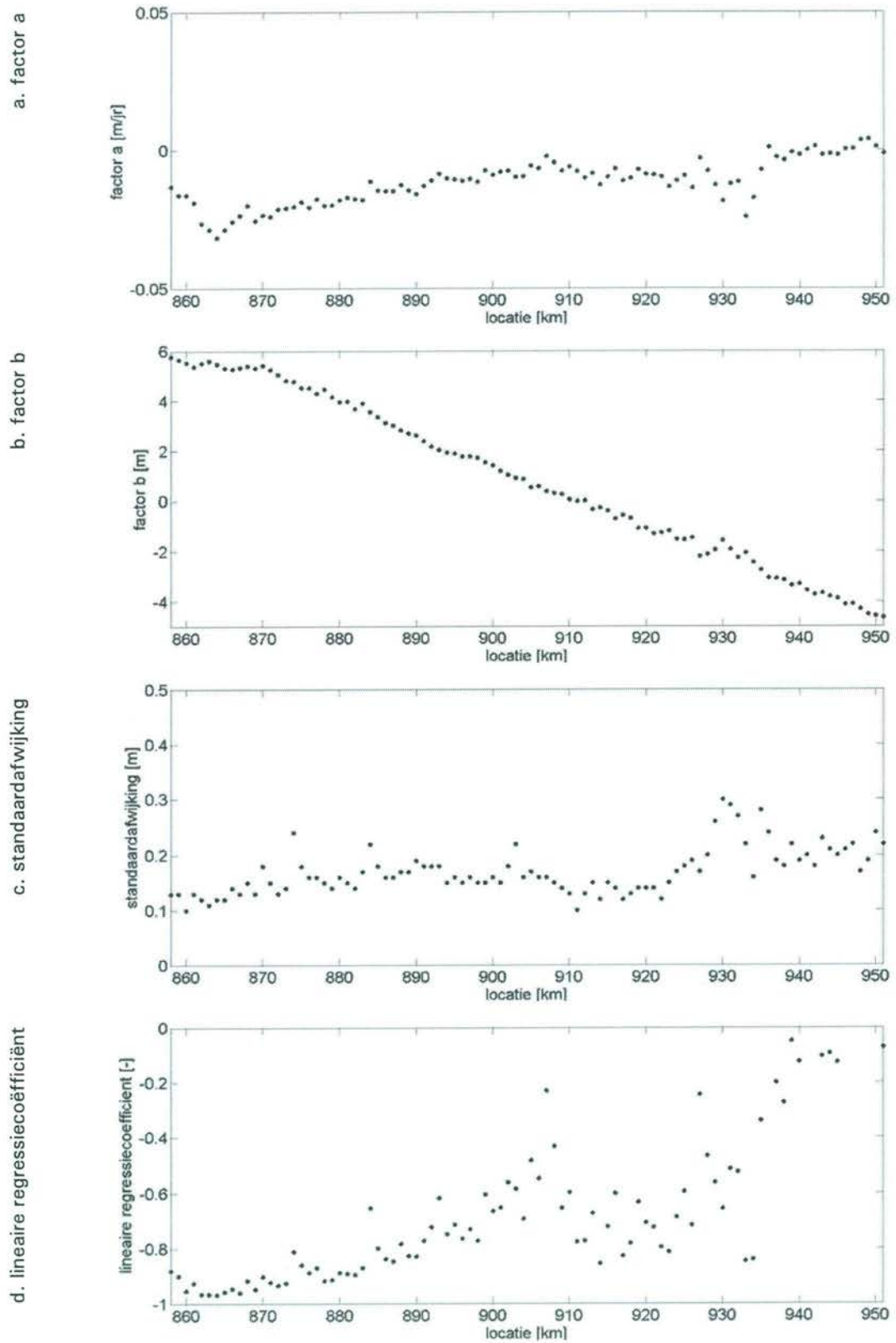


Figuur 6-2. gemeten zomerbed-gemiddelde bodemligging en de lineaire fit van de tijdsafhankelijke bodemligging in de periode 1926-1999 voor rivierlocatie (a) km 860 en (b) km 938 in de Bovenrijn en de Waal.

De factoren  $a_i$ ,  $b_i$  en de standaardafwijking van de normaalverdeelde variabele  $\varepsilon_i$  zijn voor alle rivierlocaties op de Bovenrijn en Waal en de IJssel weergegeven in Figuur 6-3a-c en Figuur 6-4a-c.

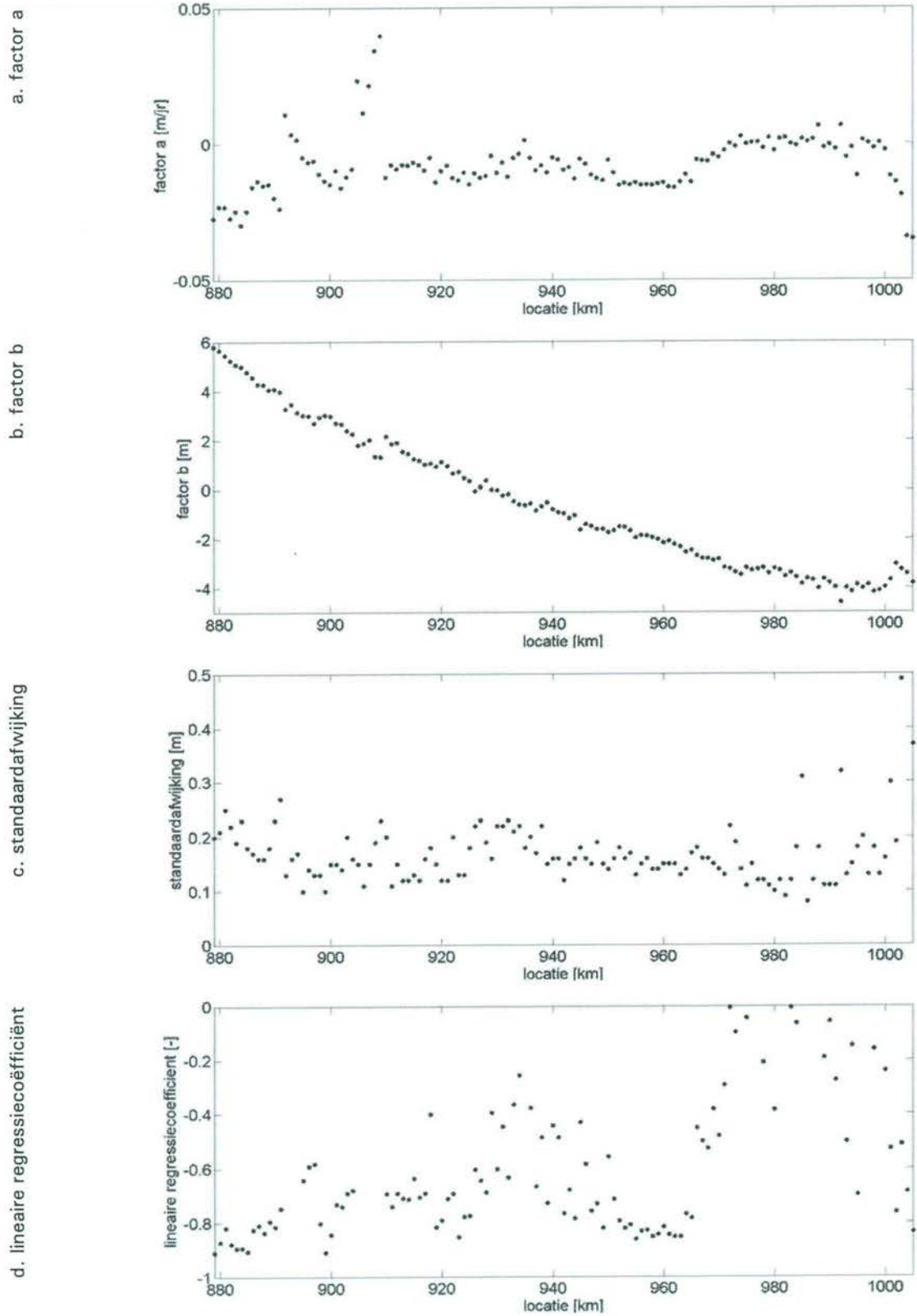
In Figuur 6-3a is te zien dat de factor  $a$  negatief is op het Bovenrijn-Waaltraject tussen km 858 en 935. De factor is positief op het traject benedenstrooms van km 935. De jaarlijkse bodemdaling neemt af in benedenstroomse richting. Op het traject vanaf km 935 is er zelfs sprake van een lichte jaarlijkse bodemstijging. Dit komt overeen met de afname van het bodemverhang die te zien is in Figuur 6-5a, waar de bodemligging op de Bovenrijn en de Waal in het jaar 1950 en 1999 is uitgezet.

Voor de IJssel het verloop van factor a langs de rivier min of meer constant. De bodem daalt jaarlijks in de orde van 0.02 m.

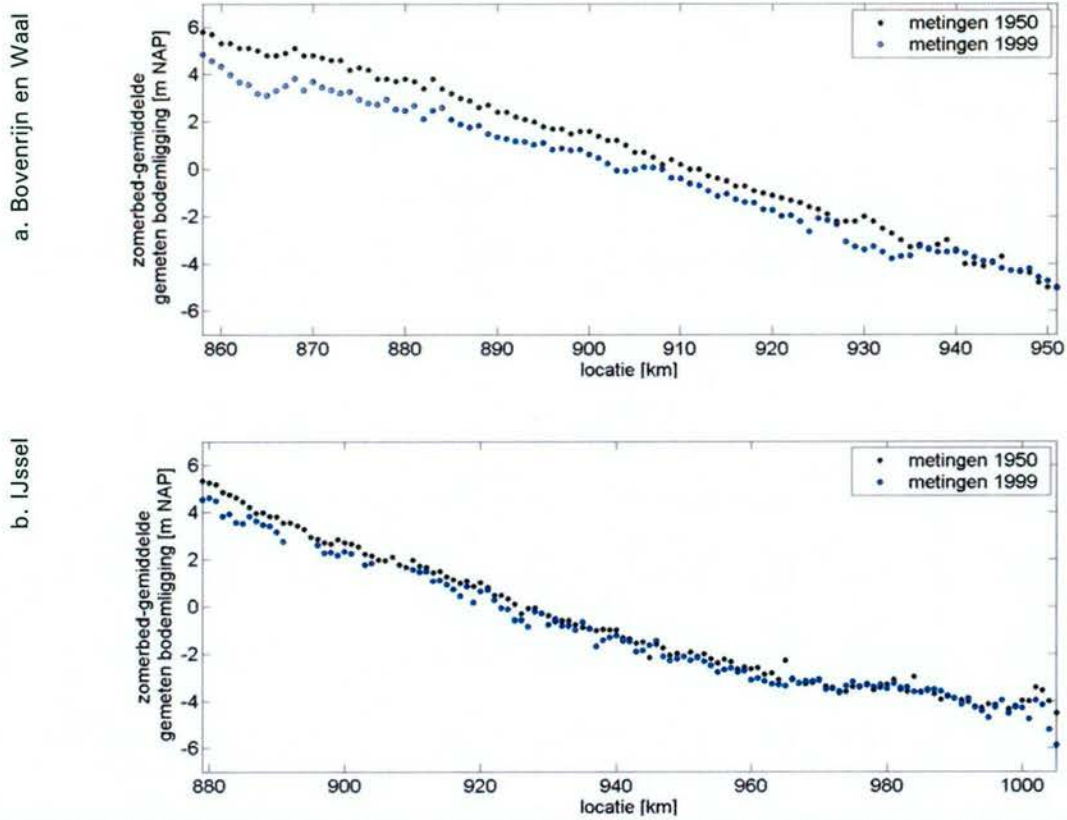


Figuur 6-3. het verloop van factor a, factor b, de standaardafwijking van de bodemligging ten opzichte van het lineaire verband en (d) de lineaire regressiecoëfficiënt voor de Bovenrijn en de Waal.





Figuur 6-4. het verloop van factor a, factor b, de standaardafwijking van de bodemligging ten opzichte van het lineaire verband en (d) de lineaire regressiecoëfficiënt voor de IJssel.



Figuur 6-5. zomerbed-gemiddelde gemeten bodemmetingen in 1950 en 1999 op (a) de Bovenrijn en de Waal en (b) de IJssel.

De lineaire regressiecoëfficiënt geeft aan in welke mate de tijdsafhankelijke bodemligging op rivierlocatie  $i$  met een lineair verband mag worden beschreven. De lineaire regressiecoëfficiënt per rivierlocatie is gegeven in Figuur 6-3d en Figuur 6-4d en wordt als volgt bepaald:

$$\rho_{z,t} = \frac{\sum_{k=1}^n (z_i(k) - \bar{z}_i)(t(k) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (z_i(k) - \bar{z}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (t(k) - \bar{t})^2}} \tag{9}$$

Uit de figuren blijkt dat zowel op de Bovenrijn en de Waal, als op de IJssel, de lineaire regressiecoëfficiënt in benedenstroomse richting dichter tot nul nadert. Dat wil zeggen dat in benedenstroomse richting de bodemveranderingen een steeds minder significant lineair verloop in de tijd vertonen.

Op de Waal gaat bijvoorbeeld de regressiecoëfficiënt benedenstrooms van km 920 snel richting de waarde nul. Dit komt niet zozeer doordat er geen duidelijke lange-termijn trend in de bodemontwikkeling is opgetreden, maar doordat de bathymetrische dataset beïnvloed is door incidentele en structurele veranderingen in de rivier. Hierbij valt te denken aan de constructie van vaste lagen in de rivierbochten Nijmegen (km 884) en St. Andries (km 925) en het onderhoudsbaggerwerk. De geregistreerde baggervolumes (zie Figuur 6-1) in de periode 1980-1995 zijn groter dan het totale volume in de periode 1945 -1980 en baggerwerk vond met name op het traject benedenstrooms van km 920 plaats. Dit kan een verklaring zijn voor het niet-lineaire bodemverband op de rivierlocaties benedenstrooms van km 920 (zie het tijdsafhankelijke bodemverloop van km 860 en km 938 in Figuur 6-2).



Op basis van de bovenstaande analyses met de 'ruwe' metingen kan gesteld worden dat de bodemontwikkeling beïnvloed wordt door ingrepen in het systeem. Dit beperkt een vergelijking tussen de bodemvariatie rond het tijdsafhankelijke bodemverloop per locatie volgend uit de metingen en de resultaten van de Monte Carlo simulaties. Om toch tot een vergelijking te komen, is het van belang de dataset te corrigeren voor de niet-homogeniteiten of de data-analyse te beperken tot 'homogene' subdatasets. Homogeniseren van de dataset is niet goed mogelijk doordat gedetailleerde informatie over de (structurele en met name incidentele) ingrepen ontbreekt.

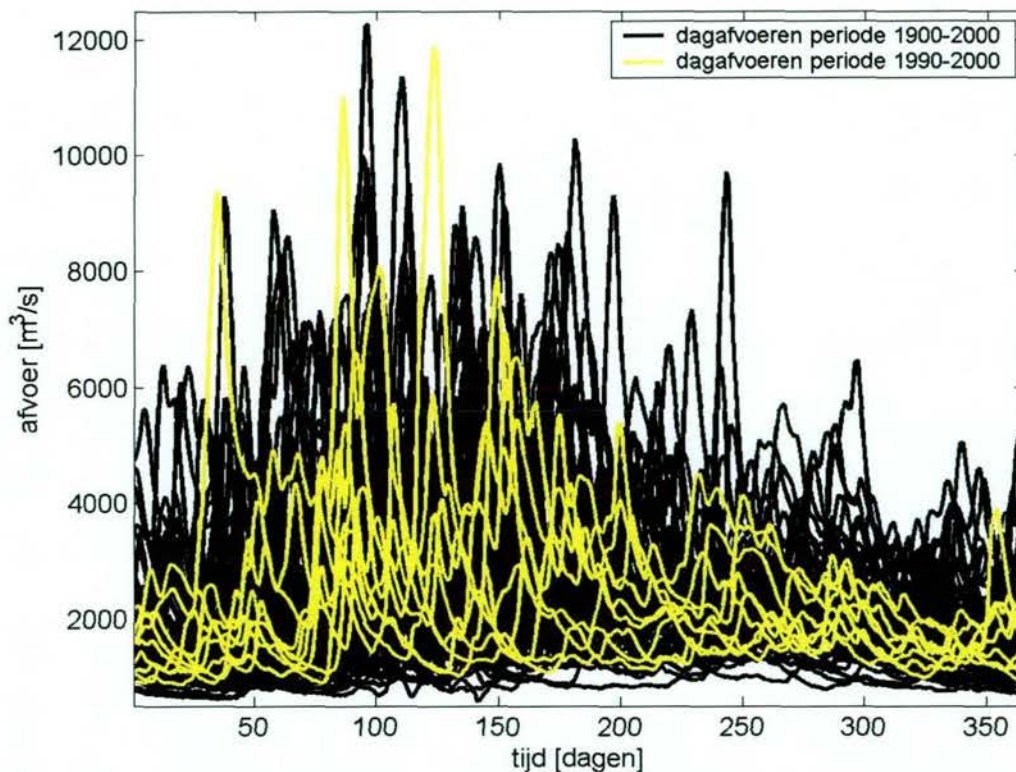
## 6.2.2 Data-analyse op 'homogene' subdatasets

### *Bovenrijn en Waal*

Op basis van Tabel 6-1 en Figuur 6-1 kan voor de Bovenrijn en Waal onderscheid worden gemaakt in drie afzonderlijke perioden:

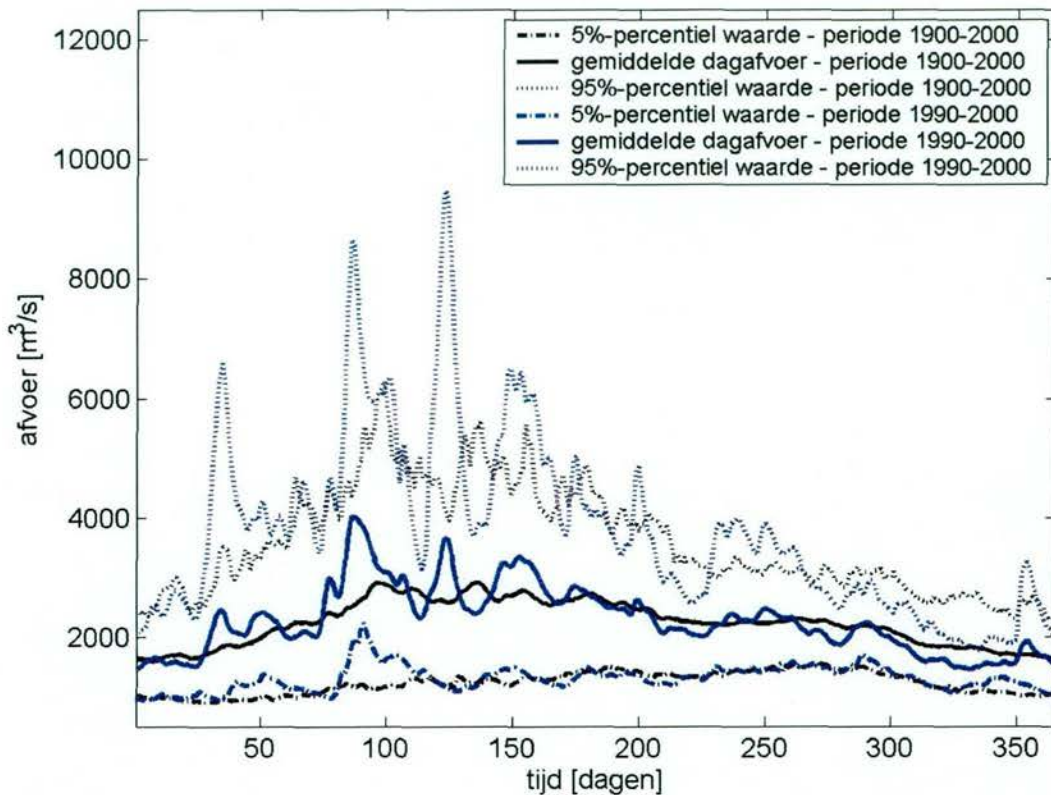
- periode 1953 - 1970: periode na de afronding van de rivierregulering, waarin geen belangrijke rivierkundige ingrepen zijn uitgevoerd.
- periode 1970 - 1990: de afsluiting van Haringvliet en Volkerak.
- periode vanaf 1990 - heden: vanaf 1990 wordt een nieuw baggerbeleid gevoerd, waarin geen netto sedimentonttrekkingen in de rivier zijn toegestaan en geen belangrijke rivierkundige ingrepen zijn uitgevoerd.

Gedurende de periode 1970-1990 ondervond het riviersysteem grote invloed van de afsluiting van het Haringvliet en het Volkerak. De afsluitingen leidden tot een reductie van getij-invloed op het benedenstroomse deel van de Waal. Hierdoor reduceerde de maximale stroomsnelheid en nam het sedimenttransport af. Als gevolg hiervan is de rivierbodem in de benedenstroomse delen van de Waal gaan aanzanden. Om deze aanzanding tegen te gaan is het onderhoudsbaggerwerk vanaf 1970 toegenomen (zie ook Figuur 6-1). De afsluiting en het onderhoudsbaggerwerk leidt tot niet-homogeniteiten in de dataset. In dit onderzoek zijn daarom de bodemmetingen over de periode 1970-1990 niet beschouwd. De analyse is beperkt tot de recentste periode van 1990 tot heden. In Figuur 6-6 zijn de jaarlijkse afvoerverlopen uit deze periode uitgezet samen met de afvoerverlopen sinds 1900. In Figuur 6-7 zijn de karakteristieken van het afvoerverloop in de 10-jarige periode vergeleken met die uit de hele registratieperiode. Uit beide figuren wordt geconcludeerd, dat de hydrologie uit de periode 1990-2000 redelijke overeenkomst vertoont met die voor de gehele afgelopen eeuw.



Figuur 6-6. Afvoerverlopen bij Lobith in de periode 1990-2000 (geel) en 1900-2000 (zwart)





Figuur 6-7. Karakteristieken jaarlijkse afvoerverloop Lobith in de periode 1990-2000 respectievelijk 1900-2000

Met behulp van de Spearman-rang-correlatietest (Dahmen en Hall, 1989) is nagegaan of er sinds 1990 een trend in de waargenomen bodemontwikkeling aanwezig is. De methode is eenvoudig toepasbaar en kan onafhankelijk van de statistische verdeling van de bodemdata worden toegepast. Een bijkomend voordeel is dat de Spearman-rang-correlatietest een krachtige methode is om te bepalen of er trend aanwezig is, ongeacht of deze trend lineair dan wel niet-lineair is.

De Spearman-rang-correlatietest is gebaseerd op het rangschikken van de N metingen op locatie i. Ten eerste worden per locatie de N bodemmetingen op basis van het meettijdstip gerangschikt van klein naar groot. De meting op het kleinste tijdstip wordt vervangen door de waarde 1, het op een na kleinste meettijdstip wordt vervangen door de waarde 2, enzovoort.  $K_i$  is de waarde die is toegekend aan het meettijdstip. Vervolgens zijn de bodemmetingen met de bijbehorende waarden  $K_i$  gerangschikt op basis van de bodemmetingen van klein naar groot. Op overeenkomstige wijze wordt een waarde  $K_z$  van 1 tot en met N toegekend aan de kleinste tot en met de grootste bodemmeting. De N bodemmetingen krijgen zo elk een waarde  $K_i$  en  $K_z$ . De Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt wordt met behulp van deze waarden als volgt berekend:

$$R_{SP_i} = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{n=1}^N ((K_i(n) - K_z(n)) \cdot (K_i(n) - K_z(n)))}{N \cdot (N \cdot N - 1)} \tag{10}$$

De Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt geeft het monotoon verband tussen de bodemligging en de tijd weer. Indien de correlatiecoëfficiënt dichtbij +1 (of -1) ligt, neemt de bodemligging als functie van de tijd toe (of af). Er is geen sprake van een monotoon verband als de coëfficiënt gelijk is aan nul.

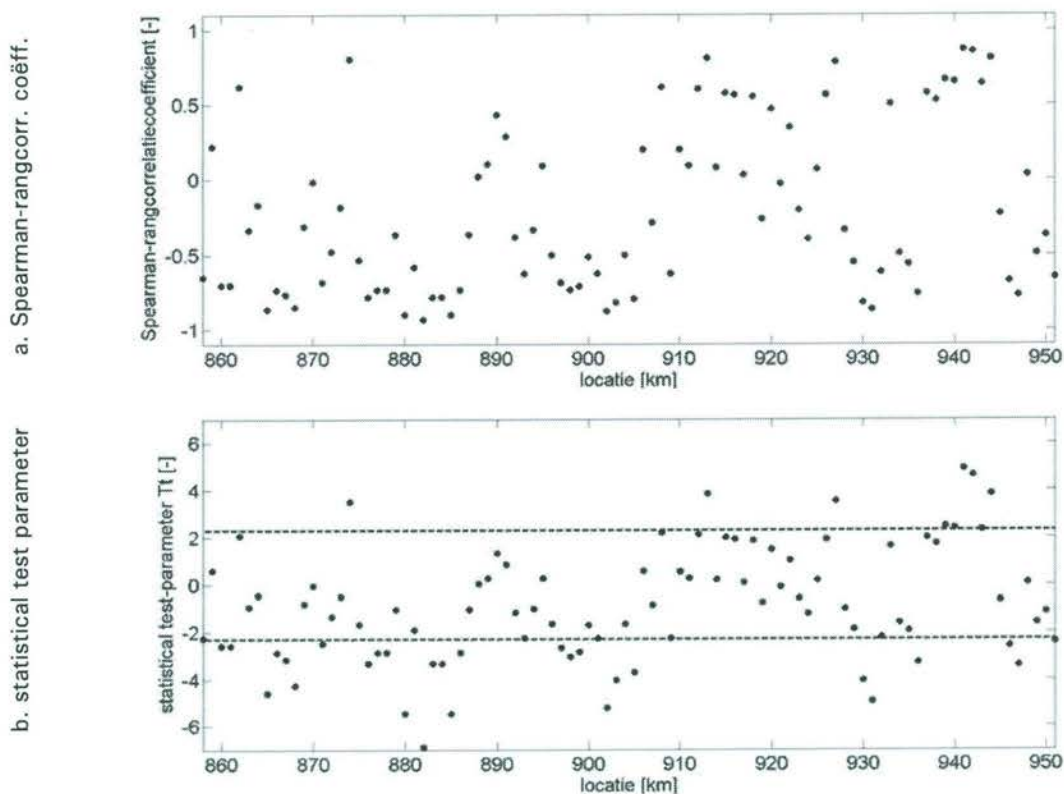
De nul-hypothese,  $H_0: R_{SPi} = 0$  (er is geen significante trend) wordt vervolgens getest tegen de hypothese,  $H_1: R_{SPi} < > 0$  (er is een significante trend), met:

$$T_{t_i} = R_{SPi} \left( \frac{N-2}{1-R_{SPi} \cdot R_{SPi}} \right)^{0.5} \tag{11}$$

Hierin heeft de statistische test-parameter  $T_t$  de Student-T-verdeling. Dit is een symmetrische verdeling rond  $t=0$ ; Met andere woorden, de dataset bevat geen significante trend indien:

$$t\{N-2, 2.5\% \} < T_{t_i} < t\{N-2, 97.5\% \} \tag{12}$$

Voor elke rivierlocatie is voor de metingen uit de periode 1990 tot heden de Spearman-rang-correlatie test uitgevoerd. De  $R_{SPi}$  en  $T_t$  zijn weergegeven in Figuur 6-8.



Figuur 6-8. Spearman-rang-correlatie test voor de periode 1990 tot heden in de Bovenrijn en de Waal: (a) Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt en (b) statistical test parameter.

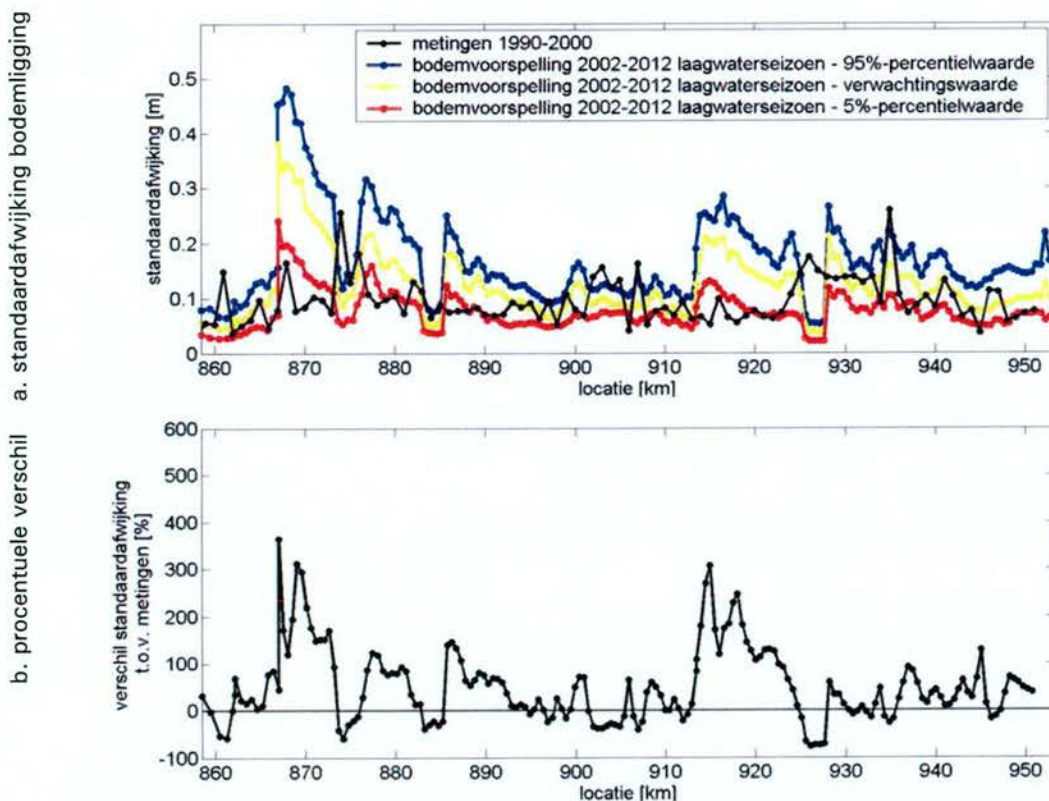
De Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt in Figuur 6-8a is langs de rivier afwisselend positief en negatief. Dit wijst op een afwisselend patroon langs de rivier van aanzanding (positieve rangcorrelatie) en erosie (negatieve rangcorrelatie) van de bodem als functie van de tijd. Als de statistische test-parameter uit de Student-verdeling in Figuur 6-8b tussen de gestippelde lijnen valt, is er geen sprake van een significante trend (aanzanding of erosie). Valt de parameter buiten de aangeduide band, dan is een significant trend aanwezig. Figuur 6-8b laat zien dat er geen eenduidig beeld bestaat over de aanwezigheid van een trend. Om die reden worden twee analyses uitgevoerd: (1) een analyse waarin we aannemen dat de bodemmetingen in de periode 1990 tot heden geen significante trend vertonen; (2) een analyse waarin wel een significante trend aanwezig is. In de eerste situatie kunnen de jaarlijkse bodemmetingen statistisch onafhankelijk van elkaar worden beschouwd. In de tweede situatie moet voor de aanwezige trend worden gecorrigeerd.



*Geen significante trend - jaarlijkse bodemmetingen statistisch onafhankelijk beschouwd*

Bij de afwezigheid van een trend kunnen de jaarlijkse bodemmetingen statistisch onafhankelijk van elkaar worden beschouwd. De standaardafwijking rond de gemiddelde bodemligging over de afgelopen gemeten 10 jaar is per locatie uitgezet in Figuur 6-9 en geeft inzicht in de waargenomen bodemvariabiliteit. De natuurlijke bodemvariabiliteit is mogelijk onderdrukt door het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk. Gedurende een berekeningsperiode van 10 jaar (2002-2012) zijn de dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemvoorspellingen in het laagwaterseizoen (maand september) gebruikt om de standaardafwijking rond de gemiddelde bodemvoorspellingen over de berekeningsperiode te bepalen. Per rivierlocatie is de standaardafwijking rond de gemiddelde bodemvoorspelling uitgezet in Figuur 6-9. Tevens is de 90% betrouwbaarheidsband van de berekende standaardafwijking gegeven. Doel daarvan is om te kijken of de standaardafwijking van de gemeten bodemvariabiliteit in de periode 1990-2000 binnen de betrouwbaarheidsband van de berekende standaardafwijking valt.

Uit Figuur 6-9b volgt, dat de verwachtingswaarde van de standaardafwijking volgend uit de berekeningen, waarin een groot aantal afvoertijdreeksen wordt doorgerekend, op de meeste locaties groter is dan de standaardafwijking die volgt uit metingen. De verwachtingswaarde van de standaardafwijking volgend uit de berekeningen ligt gemiddeld, met 0,13 m, circa 50% hoger dan de standaardafwijking die op basis van de metingen is bepaald (0,09 m). Hierbij moet worden opgemerkt, dat in de berekeningen alleen het afvoerproces als onzekere parameter is meegenomen en in de metingen uiteraard alle onzekerheidsbronnen een rol spelen. Wel is aangetoond (zie ook paragraaf 1.3) dat de onzekerheid in het afvoerproces het belangrijkste is voor de onzekerheid in morfologische veranderingen.



Figuur 6-9. (a) standaardafwijking rond de gemiddelde bodemligging volgend uit metingen in de periode 1990-2000 en de modelvoorspellingen in het laagwaterseizoen in de berekeningsperiode 2002-2012 voor de Bovenrijn en de Waal en (b) het procentuele verschil tussen deze standaardafwijkingen.

Uit Figuur 6-9a volgt dat de standaardafwijking uit de metingen wel grotendeels binnen de betrouwbaarheidsband rond de berekende standaardafwijking ligt. Hieronder zijn de locaties



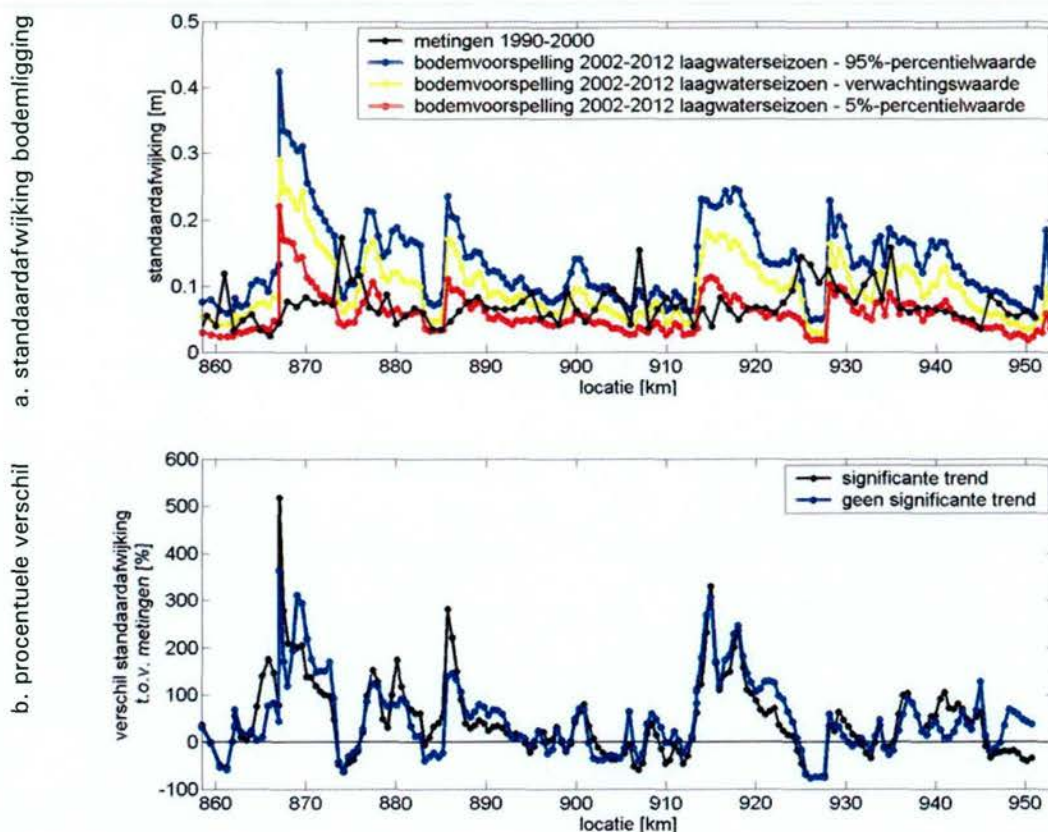
benoemd waar de gemeten standaardafwijking duidelijk buiten de betrouwbaarheidsband valt met mogelijke verklaringen:

1. km 867-873: Hier is de berekende bodemvariatie groter dan gemeten. Dit is juist benedenstrooms van het splitsingspunt Pannerdense Kop. Bekend is dat in het één-dimensionale SOBEK-model de morfologische veranderingen ter plaatse van het splitsingspunt, en als gevolg ook op het stuk direct benedenstrooms, overschat. Met name het proces van de verdeling van het sediment over Waal en Pannerdens Kanaal (in rekenmodel wordt uitgegaan van een sedimentverdeling evenredig met de waterverdeling) speelt hierbij een belangrijke rol;
2. km 873-876 (bocht Erlecom): Hier is de berekende bodemvariatie juist kleiner dan gemeten. In het model zijn de bodemkribben in deze bocht geschematiseerd door een kleinere Chézy-ruwheidscoëfficiënt (ruwere bodem) en een maximale erosiediepte te definiëren. Hierdoor wordt er weinig bodemvariabiliteit voorspeld in de modelresultaten (zie ook de kleine 90%-betrouwbaarheidsband in Figuur 6-9). De bodemkribben liggen in werkelijkheid met name in de buitenbocht. Dat wil zeggen dat er nog wel bodemvariabiliteit plaatsvindt in de binnenbocht. Als gevolg hiervan is de variabiliteit in de werkelijkheid ter plaatse van dergelijke bodemconstructies groter dan met de berekeningen is voorspeld.
3. km 876-881 (benedenstrooms bodemkribben Erlecom): Direct benedenstrooms van de bodemkribben is de variabiliteit voorspeld met de berekeningen juist wat groter. Dit heeft uiteraard met voorgaand punt te maken.
4. km 883-889: In de bocht bij Nijmegen ligt van km 883 tot km 885 de vaste laag. Hiervoor geldt hetzelfde als voor de bodemkribben in de bocht van Erlecom. Ook hier zien we de toename van de berekende variabiliteit benedenstrooms van de vaste laag.
5. km 913-919: Hier is de berekende variabiliteit belangrijk groter dan volgend uit de metingen. Hierbij kunnen de volgende punten van belang zijn:
  - a. Bekend is, dat rond km 911-912 de dwarsprofielen in het SOBEK-model zodanig zijn, dat de morfologische processen worden overdreven (mondellinge mededeling C. Sloff);
  - b. Benedenstrooms van km 915 zijn de korrelgrootte en ribbelfactor in het SOBEK-model aangepast. Hiermee wordt de sedimenttransportcapaciteit vergroot, waardoor de enorme aanzanding die anders zou ontstaan wordt gereduceerd. Dit geeft ter plaatse uiteraard een sprong in het sedimenttransport (en -gradiënten) en daarmee in de morfologische veranderingen.
  - c. Benedenstrooms van km 905 wordt relatief veel baggerwerk uitgevoerd (zie ook Figuur 6-1a). Dit kan leiden tot een onderdrukking van de natuurlijke variabiliteit.
6. km 924-928: Hier ligt de vaste laag in de bocht van St. Andries. De verschillen tussen gemeten en berekende bodemvariatie zijn vergelijkbaar als bij Erlecom en Nijmegen.

*Wel een significante trend - bodemmetingen en berekeningen gecorrigeerd voor lineaire trend*

In deze analyse is aangenomen dat er een significante trend in de bodemligging aanwezig is. De gemeten dwarsdoorsnede bodemligging over de periode 1990 tot heden is per rivierlocatie beschreven met een lineair verband (zie formule 8). De standaardafwijking rond dit lineaire verband geeft inzicht in de bodemvariabiliteit. Dezelfde analyse is herhaald voor de bodemberekeningen en de resultaten zijn in Figuur 6-10 weergegeven. In de figuur is ook de standaardafwijking gegeven voor de analyse waarin geen statistisch significante trend is verondersteld. De standaardafwijkingen waarbij is uitgegaan van een significante trend in de bodemmetingen en berekeningen (gemiddeld respectievelijk 0,07 m en 0,09 m) vallen lager uit dan de standaardafwijkingen zonder significante trend (gemiddeld respectievelijk 0,09 m en 0,13 m). Ze volgen wel dezelfde tendens. De bandbreedte van de standaardafwijking van de berekende bodemligging is nagenoeg gelijk voor de analyses met en zonder trend.





Figuur 6-10. (a) standaardafwijking rond de bodemligging waarbij is aangenomen dat er wel een significante trend in de bodemverandering aanwezig is volgend uit metingen in de periode 1990-2000 en de modelvoorspellingen in het laagwaterseizoen in de berekeningsperiode 2002-2012 voor de Bovenrijn en de Waal en (b) het procentuele verschil tussen deze standaardafwijkingen (verschil zonder trend nogmaals getoond).

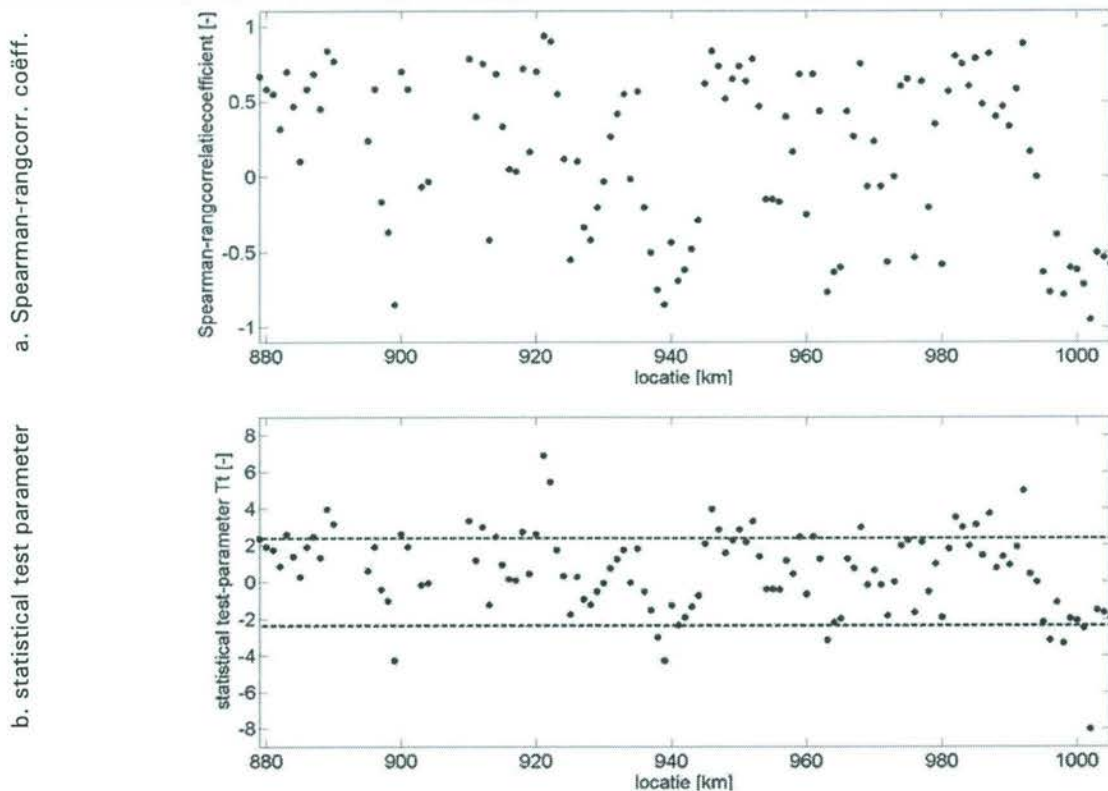
De resultaten voor de analyse met significante trend zijn erg vergelijkbaar met de analyse zonder trend. De bij die analyse beschreven afwijkingen en verklaringen blijken derhalve algemeen geldig te zijn.

### IJssel

Op basis van Tabel 6-1 en Figuur 6-1 is voor de IJssel onderscheid gemaakt in de periode voor en na 1990. In de periode voor 1990 zijn bochtafsnijdingen uitgevoerd ter plaatse van Doesburg (km 902 in 1954) en Rheden (km 888-889 in 1969). De lengte van de rivier reduceerde hierdoor met 8,6 km. In de jaren '70 en '80 is vrij veel baggerwerk uitgevoerd. Door deze ingrepen is de dataset van voor 1990 niet-homogeen. Vanaf 1990 is geen grootschalig onderhoudsbaggerwerk meer uitgevoerd in de IJssel. De dataset wordt vanaf 1990 als homogene subdataset beschouwd.

Met behulp van de Spearman-rang-correlatietest is nagegaan of er een trend in de waargenomen bodemontwikkeling aanwezig is. De Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt  $R_{SPi}$  en de statistische test-parameter  $T_i$  zijn weergegeven in Figuur 6-11.

Uit Figuur 6-11 blijkt, dat er op de IJssel geen eenduidige trend aanwezig is. Er is sprake van zowel aanzanding als erosie. Uit Figuur 6-11b volgt, dat op een aantal locaties (circa 1/3 van alle locaties) de statistical test parameter buiten de band valt. Dit geeft aan dat er sprake is van een significante trend. Omdat het verband niet eenduidig is, wordt de analyse uitgevoerd zowel met, als zonder dat er sprake is van een trend.



Figuur 6-11. Spearman-rang-correlatie test voor de periode 1990 tot heden in de IJssel: (a) Spearman-rang-correlatiecoëfficiënt en (b) statistical test parameter.

*Geen significante trend - jaarlijkse bodemmetingen statistisch onafhankelijk beschouwd*

De standaardafwijking rond de gemiddelde bodemligging volgend uit metingen over de afgelopen 10 jaar is per locatie uitgezet in Figuur 6-12. In dezelfde figuur is de standaardafwijking rond de gemiddelde bodemvoorspellingen na 15 jaar in het laagwaterseizoen per rivierlocatie volgend uit de Monte Carlo simulaties uitgezet, samen met de betrouwbaarheidsband daar omheen.

Uit Figuur 6-12 kan het volgende worden geconcludeerd:

1. De verwachtingswaarde voor de standaardafwijking van de gemeten bodemligging is voor de IJssel gemiddeld gezien ongeveer gelijk aan die voor de Waal (voor beide ca 0,09 m).
2. De betrouwbaarheidsband rond de verwachte standaardafwijking op de IJssel is smaller dan die voor de Waal (gemiddeld 0,06 m ten opzichte van 0,09 m voor de Waal).
3. Verder is de standaardafwijking volgend uit de metingen op enkele locaties groter dan de standaardafwijking die volgt uit berekeningen en valt deze tevens buiten de bijbehorende 90% betrouwbaarheidsband. Dit is met name het geval op het traject km 920-928, km 932-942, km 947-952 en km 985-995.

Bovenstaande punten kunnen niet zonder meer worden verklaard. De volgende opmerkingen kunnen evenwel worden gemaakt:

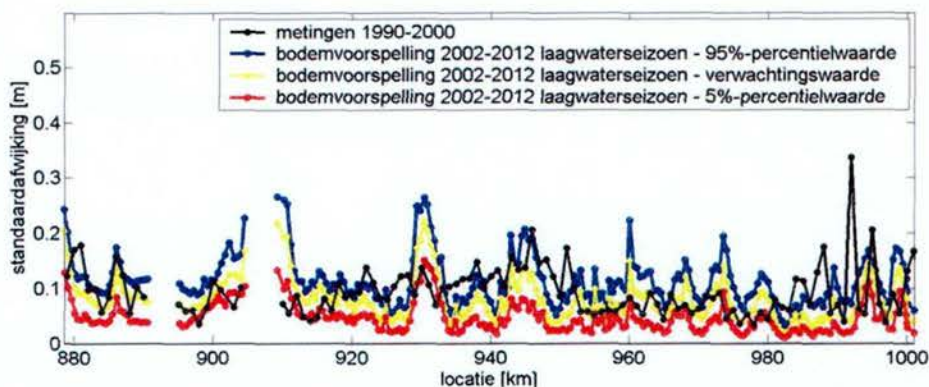
- Aangezien het afvoerloop als enige onzekerheidsbron is meegenomen, kan de berekende variabiliteit (wat) worden onderschat;
- Uit analyses voor de IJssel blijkt, dat de morfologische tijdschaal klein is ten opzichte van de Waal. Dit houdt in dat in de Waal de bodem sneller reageert op veranderingen in bijvoorbeeld geometrie of afvoer. Dit komt wel tot uitdrukking in de berekende standaardafwijking, maar niet in de standaardafwijking van de gemeten bodemligging.
- Gegevens over het baggerwerk in de IJssel in de periode 1990-2000 zijn niet voorhanden en volgens de dienstkring Twenthekanalen-IJsseldelta is er in deze periode ook geen



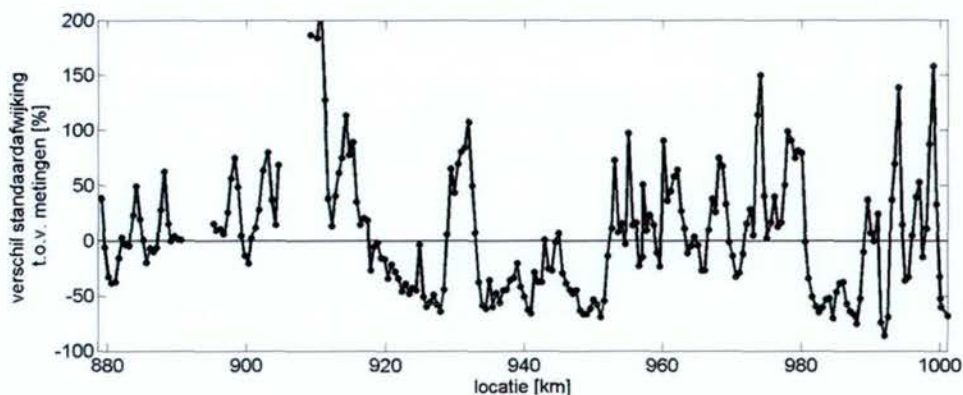
belangrijk baggerwerk uitgevoerd. Wel is bekend dat er bij km 928 (slechte belijning) en 930 (Twenthekanaal) regelmatig lokaal onderhoudsbaggerwerk wordt uitgevoerd.

- Aangezien de IJssel relatief smal is ten opzichte van bijvoorbeeld de Waal, kunnen door de gebruikte interpolatietechniek, om uit de single-beam metingen een gebiedsdekkend DTM (Digitaal Terrein Model) te maken, in de IJssel lokale verstoringen in de metingen tot grotere afwijkingen in de gemiddelde bodemliggingen leiden. Zonder nader onderzoek is over de rol hiervan niets te zeggen.
- Uit een knelpuntanalyse voor de Boven-IJssel tot km 930 (Sloff et al, 2002) blijkt, dat op de volgende punten regelmatig knelpunten aanwezig waren in de periode 1993-1999: km 883-884; km 887-891 km; km 896-903; km 905-910; km 918-919; km 920,5-921,5, rond km 928 en km 930. Indien deze knelpunten worden verruimd door baggerwerk kan de gemeten bodemvariatie daar groot zijn (of heel klein als zeer regelmatig wordt gebaggerd). Als niet wordt gebaggerd is de gemeten bodemvariatie waarschijnlijk kleiner (en dan beter in overeenstemming met de berekende bodemvariatie, omdat in de berekeningen ook niet wordt gebaggerd). Helaas ontbreken voldoende gedetailleerde baggergegevens om deze mogelijke verklaring te toetsen.

a. standaardafwijking bodemligging



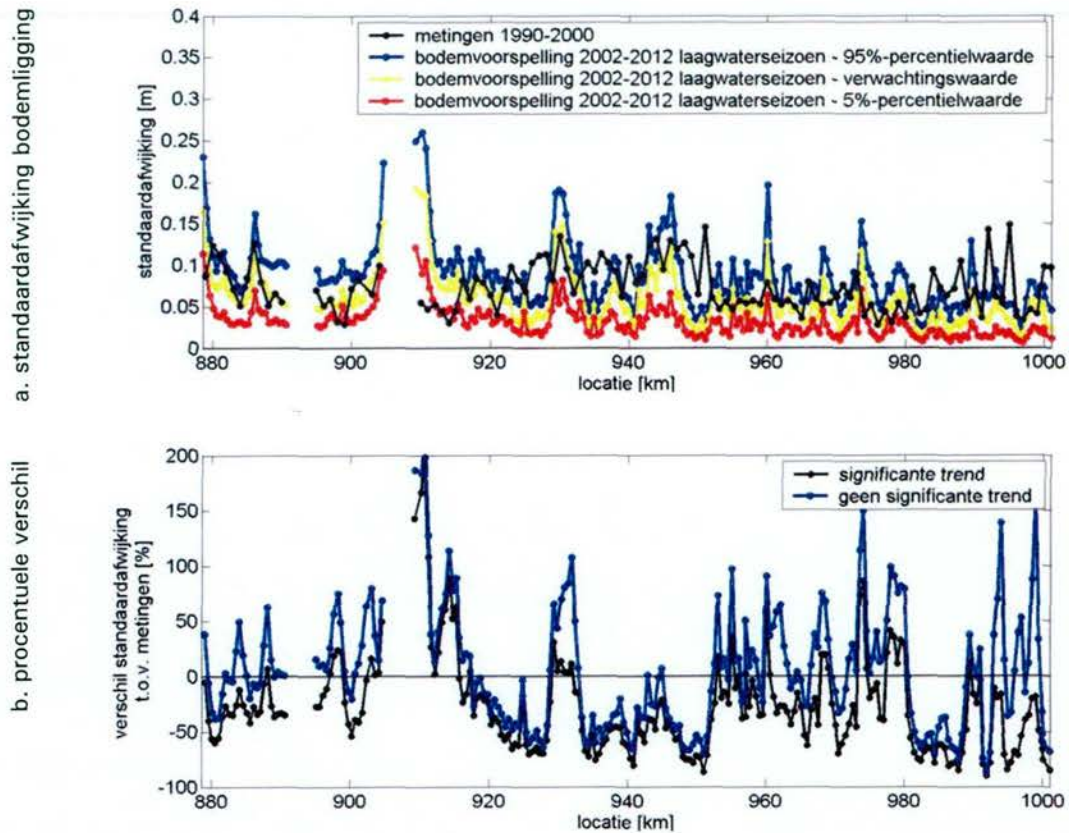
b. procentuele verschil



Figuur 6-12. (a) standaardafwijking rond de gemiddelde bodemligging volgens uit metingen in de periode 1980-2000 en de modelvoorspellingen in het laagwaterseizoen in de berekeningsperiode 2002-2012 voor de IJssel en (b) het procentuele verschil tussen deze standaardafwijkingen.

Wel een significante trend - bodemmetingen en berekeningen gecorrigeerd voor lineaire trend  
 In onderstaande figuur zijn de standaardafwijkingen en bijbehorende betrouwbaarheidsband gegeven als wel rekening wordt gehouden met een trend in de bodemligging. Net als bij de Waal, zijn de resultaten erg vergelijkbaar met de analyse zonder trend.





Figuur 6-13. (a) standaardafwijking rond de bodemligging (waarbij is aangenomen dat er respectievelijk wel en geen significante trend in de bodemverandering aanwezig is) volgend uit metingen in de periode 1980-2000 en de modelvoorspellingen in het laagwaterseizoen in de berekeningsperiode 2002-2012 voor de IJssel en (b) het procentuele verschil tussen deze standaardafwijkingen.

## Conclusies

Voor de Bovenrijn en de Waal volgt dat de standaardafwijking uit de metingen grotendeels binnen de betrouwbaarheidsband rond de berekende standaardafwijking ligt. Dit betekent dat de berekende bodemveranderingen tenminste niet conflicteren met de gemeten bodemvariëaties. Grote afwijkingen tussen berekende en gemeten bodemvariëatie kunnen worden verklaard door modelbeperkingen (splittingspunt Pannerdense Kop, 'gevoelige' traject bij km 911-912 en discontinuïteit morfologische parameters bij km 915) en fysieke ingrepen die niet (of sterk geschematiseerd) in het rekenmodel zitten (baggerwerk, vaste lagen en bodemkribben).

Voor de IJssel kan worden gesteld dat de berekende bodemvariëatie in de periode 1990-2000 goed vergelijkbaar is met de gemeten bodemvariëatie, afgezien van de trajecten km 920-928, km 932-942, km 947-952 en km 985-995. De berekende bodemvariëatie is op die trajecten kleiner dan gemeten. Zonder nader onderzoek kan niet worden gezegd of dit het gevolg is van de metingen of bewerking daarvan, eventueel uitgevoerd baggerwerk, modelbeperkingen of het niet beschouwen van andere (dan alleen de afvoer) onzekerheidsbronnen.



## 6.3 Bevaarbaarheidsanalyse en Minst gepeilde Dieptes

### Minst Gepeilde Dieptes

Met het vaststellen van Minst Gepeilde Dieptes (MGD) wordt in de praktijk het scheepvaartverkeer op de hoogte gebracht van de scheepvaartbeperkingen. De MGD is de maatgevende waterdiepte in de Bovenrijn, de Waal en de IJssel, die wordt vastgesteld als de waterstand bij Nijmegen daalt onder de 9 m + NAP. Voor de Bovenrijn en de Waal zijn de MGD's en de locaties waar deze MGD's optreden voor de periode van 1993-2003 beschikbaar. Voor de IJssel is geen digitale dataset beschikbaar. De locatie met de MGD wordt op basis van de actuele waterdiepten op het gehele riviertraject van de Bovenrijn en Waal tot aan km 960 vastgesteld.

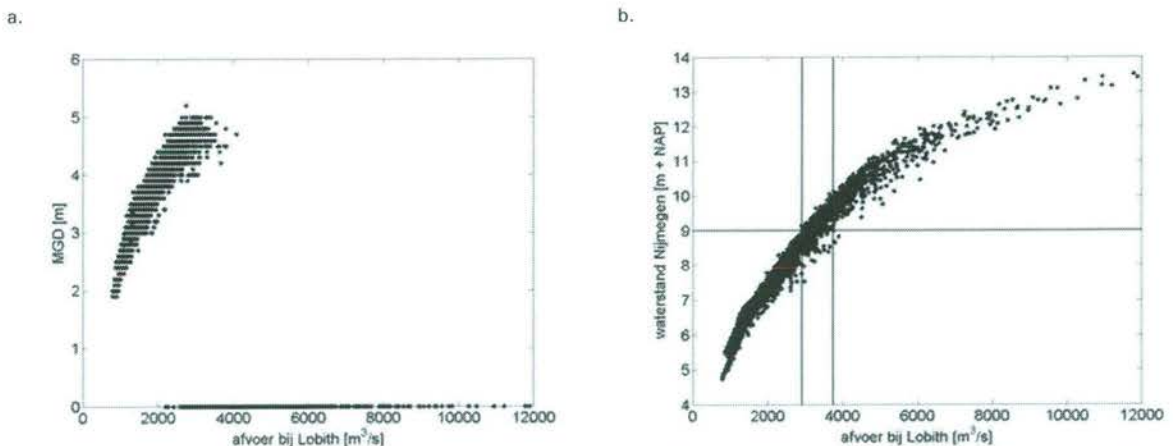
In Figuur 6-14 zijn de MGD's in de periode 1993-2003 als functie van de afvoer bij Lobith en de waterstand bij Nijmegen weergegeven. In de praktijk wordt de MGD vastgesteld als de waterstand bij Nijmegen onder de 9 m + NAP daalt. Uit Figuur 6-14a blijkt dat de maximale afvoer bij Lobith waarbij een MGD is afgegeven gelijk is aan 4.090 m<sup>3</sup>/s. De minimale afvoer waarbij geen MGD is afgegeven is gelijk aan 2.200 m<sup>3</sup>/s. Figuur 6-14b laat zien dat de afvoer bij Lobith varieert tussen de 2.900 en 3.760 m<sup>3</sup>/s als een waterstand van 9 m + NAP wordt gemeten bij Nijmegen. De grootste vastgestelde MGD is gelijk aan 5,2 m. De MGD is bedoeld om het scheepvaartverkeer te informeren over scheepvaartbeperkingen. Het grootste geladen Rijnschip heeft een diepgang van ongeveer 4,5 m. Het is dus niet nodig MGD's hoger dan 5 m af te geven.

### Overeenkomsten MGD's en MWD's op Bovenrijn en Waal

In Paragraaf 4.2 is voor elk traject de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte (MWD) en de locatie van deze maatgevende waterdiepte bepaald. De maatgevende waterdiepte komt overeen met de kleinste waterdiepte, ongeacht het afvoerniveau of de grootte van de MWD. Op basis van deze resultaten zijn:

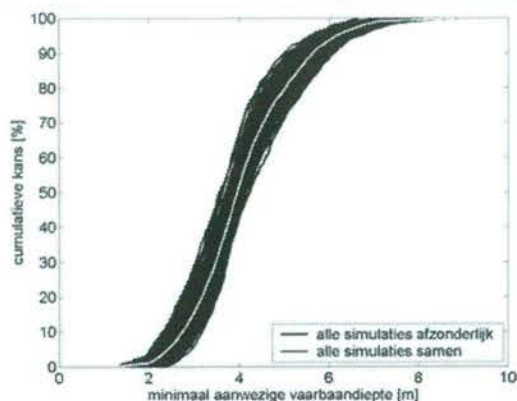
- de cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte; en
- de statistische karakteristieken van de kans op de maatgevende waterdiepte per locatie

bepaald. Deze zijn weergegeven in Figuur 4-3 - Figuur 4-6.



Figuur 6-14. Minst Gepeilde Dieptes in de Bovenrijn en de Waal in de periode 1993-2003 als functie van de afvoer bij Lobith.

Om de MGD's te vergelijken zijn de MWD's en de locaties waar deze MWD's zijn berekend voor het gehele riviertraject de Bovenrijn en de Waal. Figuur 6-15 geeft de cumulatieve kansverdeling van de MWD's voor de gehele Bovenrijn en Waal, ongeacht de grootte van het afvoerniveau bij Lobith, de waterstand bij Nijmegen of de grootte van de MWD.

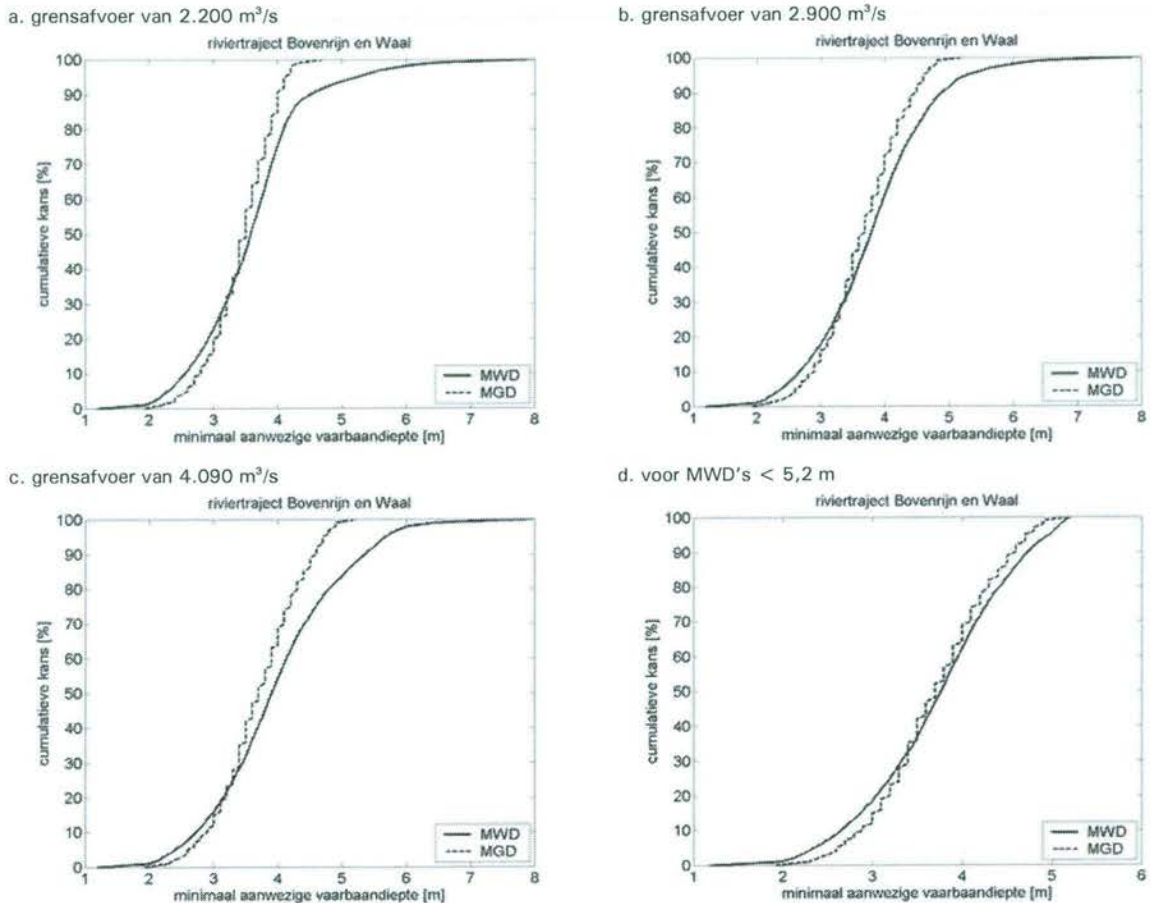


Figuur 6-15. cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte voor de gehele Bovenrijn en de Waal voor de modelsimulaties afzonderlijk en de modelsimulaties samengenomen.

In de praktijk worden de MGD's onder bepaalde omstandigheden afgegeven, namelijk als de waterstand bij Nijmegen onder de 9 m + NAP daalt. Op basis van Figuur 6-14 is gekozen de conditionele kansverdeling van de MWD's te bepalen bij afvoeren kleiner dan de grensafvoer van 2.200, 2.900 en 4.090 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en voor MWD's kleiner dan 5,2 m. De resulterende conditionele cumulatieve kansverdelingen van de MWD's zijn weergegeven in Figuur 6-16a-d.

De cumulatieve kansverdeling van de gemeten MGD's wijkt af van de conditionele kansverdelingen van de MWD's in Figuur 6-16a-c. De maximale MGD die is afgegeven is gelijk aan 5,2 m. De maximale MWD die volgt uit de modelberekeningen gegeven de grensafvoeren van 2.200, 2.900 en 4.090 m<sup>3</sup>/s is 8,0 m. De afwijking tussen de kansverdelingen is het grootste in de 'staart' van de verdeling. De afwijking reduceert als de grensafvoer kleiner wordt gekozen. Echter, ook als we de conditionele kansverdeling bepalen voor afvoeren kleiner dan de grensafvoer van 2.200 m<sup>3</sup>/s, worden MWD's hoger dan 5,2 m berekend. De conditionele cumulatieve kansverdeling van de MWD met alleen MWD's kleiner dan 5,2 m komt redelijk met de cumulatieve kansverdeling van de gemeten MGD's overeen.





**Figuur 6-16.** cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte (MWD) voor de gehele Bovenrijn en de Waal bij een grensafvoer van (a) 2.200, (b) 2.900 en (c) 4.090 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en (d) voor MWD's kleiner dan de maximale MGD van 5,2 m.

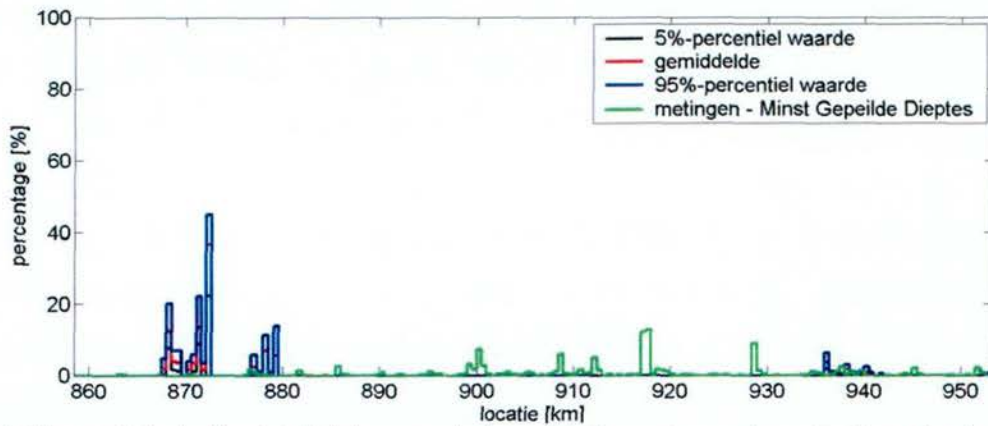
De statistische karakteristieken van de kans op de MWD (voor MWD's kleiner dan de maximale MGD van 5,2 m) en de MGD per locatie zijn te zien in Figuur 6-17. De locaties met de grootste kans op de MWD en de MGD komen niet geheel met elkaar overeen. Met name op het Waaltraject tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen is de kans op een MWD groot. Terwijl op dit traject vrijwel nooit een MGD wordt vastgesteld. Op de Midden-Waal wordt wel frequent een MGD-locatie vastgesteld, terwijl uit de kans op een MWD-locatie volgend uit de berekeningen daar klein is.

Het verschil tussen berekende MWD en afgegeven MGD kan als volgt worden verklaard:

1. In bochten zoals het Waaltraject tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen wordt vaak wel een MGD gemeten, maar niet afgegeven. De beschikbare vaargeulbreedte wordt dan verkleind door het plaatsen van bakens in de rivier. De MGD wordt dan op een andere locatie in de rivier afgegeven. Op het Waaltraject tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen (km 867 - 874) worden de grootste scheepvaartbeperkingen op de Bovenrijn en Waal voorspeld. Op dit bochtige traject zijn de 1D-waterdieptecorrecties groot. De waterdiepte op deze rivierlocaties is dan maatgevend voor de gehele Bovenrijn en Waal. Als we trajectmatig kijken (zie MWD-locaties per riviertraject in Figuur 4-6-Figuur 4-8) dan zien we dat de locaties rond km 900, km 910, km 917 en km 930 de bevaarbaarheid op de trajecten beperken. Deze locaties komen overeen met de MGD-locaties in Figuur 6-17.
2. Daarnaast kunnen de verschillen worden verklaard door 2-dimensionale morfologische verschijnselen die in de rivier optreden. Niet alleen de aanwezigheid van bochten zorgt voor een 2D-morfologisch gedrag van de rivier. Uiterwaarden afwisselend aan de rechter- en linkeroever en rechtstanden tussen twee tegengestelde rivierbochten zorgen ook voor een asymmetrisch karakter van de rivierbodem. MGD worden op de Midden-Waal met

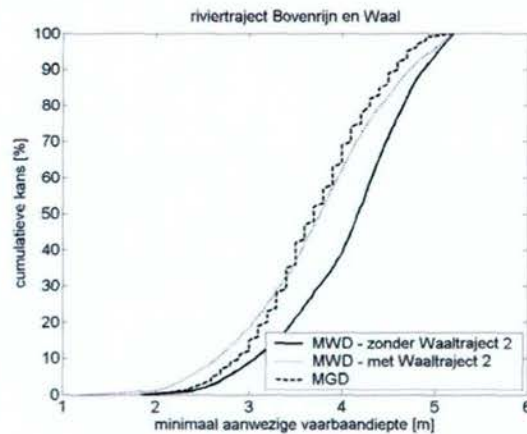
name afgegeven door ondieptes midden in de rivier. Op dit traject is de aaneengesloten breedte waarover de rivier een bepaalde diepte heeft klein.

De wijze waarop in de praktijk de MGD wordt vastgesteld en de 2-dimensionale morfologische verschijnselen in de rivier zorgen er voor dat de MWD- en MGD-locaties niet goed met elkaar overeenkomen.



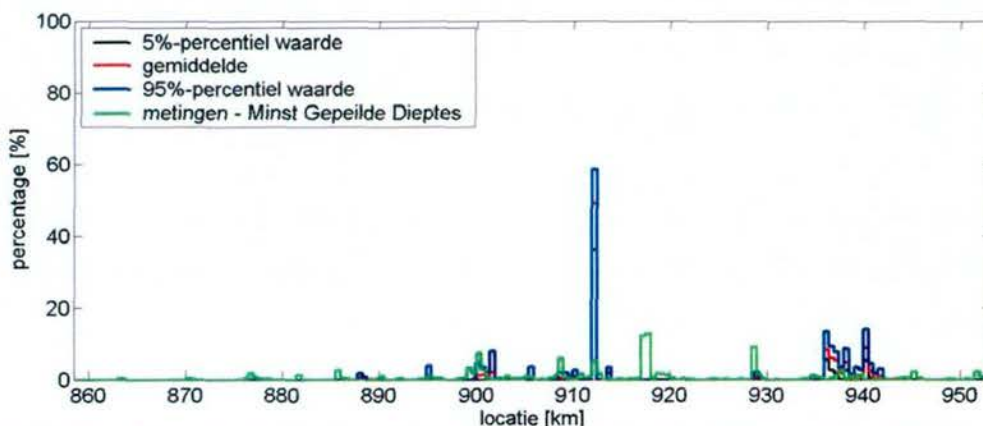
Figuur 6-17. statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte (in de uitgangssituatie zonder onderhoudsbaggerwerk) en de MGD op de Bovenrijn en de Waal zich op locatie x bevindt.

Als we voor bepaling van de MWD's de Waalbochten buiten beschouwing laten (omdat daar in werkelijkheid nooit een MGD wordt afgegeven), zien we in Figuur 6-18 dat de kansverdelingsfunctie tussen meting en voorspelling minder goed overeenkomt. De MWD is doorgaans groter dan de MGD. Dit kan uiteraard het gevolg zijn van eerder genoemde 2D-effecten die in de 1-dimensionale morfologische berekeningen niet kunnen worden gesimuleerd. Uit Figuur 6-19 kan worden geconcludeerd, dat de locaties van MGD en MWD beter overeenstemmen als Waaltraject 2 niet wordt meegenomen. Rond km 912-915 wordt de MWD wel heel vaak voorspeld. Dit wordt naar verwachting veroorzaakt door de gevoeligheid van het SOBEK-model op die locatie. Kleine veranderingen in stromingscondities of geometrie zorgen in dat traject voor grote morfologische veranderingen, waardoor ook vaak daar de MWD wordt voorspeld.



Figuur 6-18. cumulatieve kansverdeling van de maatgevende waterdiepte (MWD) met en zonder Waaltraject 2, vergeleken met de kansverdeling voor MGD's





Figuur 6-19. Vergelijking locaties MGD en MWD indien Waaltraject 2 niet wordt beschouwd

### Kwalitatieve gegevens nautische knelpunten op IJssel

Van de IJssel zijn de MGD's minder goed gedocumenteerd dan voor de Waal. In Struijk (1993) is echter wel een opsomming gegeven van locaties waar in de periode 1985-1990 regelmatig de maatgevende diepte is opgetreden. In Tabel 6-2 zijn de conclusies uit deze studie gepresenteerd en is tevens aangegeven (met een X) of deze knelpunten ook uit de huidige berekeningen komen (zie ook Figuur 4-6b).

Traject	Ook uit simulaties?	Opmerkingen
Km 880.800-881.300	X	
Km 883.700-884.200	X	
Km 886.900-887.000		
Km 890.800/900		Uitvaart oude arm Rhederlaag
Km 900.050	X	Oversteek
km 901.200-902.400		Situatie bij Doesburg-haven en -brug
km 927.700-928.100:		Kade + bruggen Zutphen
km 930.000-931.150:	X	Uitvaart industriehaven + uitvaart Twenthekanaal
km 934.000-935.450	X	Bocht Nijenbeek, slecht verlopende bochtstraal ("hoekig")
km 938.200-938.300:		
km 939.200-939.300:		
km 941.350-942.300:		
km 944.200-944.400:	X	
km 953.500		
km 969.750-970.400		
Km 974.800		Uitvaart Centrale Harculo
Km 976.700/900		
Km 977.200/400		
Km 978.400		
Km 979.800		
Km 980.300- 981.900		Bruggen Hattem
Km 987.500- 987.800		
Km 995.300- 997,300		
Km 1000.800- 1001.250	X	Kampen
Km 1002.000- 1002.550		

Tabel 6-2: Gemeten (Struijk, 1993) en berekende knelpunten op de IJssel

Uit het overzicht blijkt, dat er zeker overeenkomsten zijn tussen waargenomen en voorspelde knelpunten. Veel waargenomen knelpunten zijn ook het gevolg van zeer lokale situaties, waarvan de morfologische consequenties met het 1-dimensionale rekenmodel niet goed kunnen worden voorspeld.

Daarentegen zijn er ook een paar locaties waar wel zo nu en dan knelpunten worden voorspeld, maar blijkbaar niet regelmatig waargenomen, te weten: km 952, 957,5, 960,5, 962,5-964 en 985.

### Conclusies

Voor de Waal wordt geconcludeerd, dat de MGD's naar verwachting worden afgegeven voor waarden kleiner dan 5,2 m en dat op het traject van de Waalbochten (Waal2) geen MGD's worden afgegeven, omdat daar eerder voor versmalling van de vaargeul (betonning) wordt gekozen. Indien de MGD's worden vergeleken met de berekende MWD's (maatgevende waterdiepte), waarbij MWD's boven 5,2 m zijn uitgesloten en Waaltraject 2 niet wordt beschouwd, blijkt dat:

- De MWD's enigszins groter zijn dan de afgegeven MGD's. Dit is naar verwachting het gevolg van het niet kunnen modelleren van sterk 2- en 3-dimensionale patronen met het 1-dimensionale SOBEK-model;
- De locaties van MGD's en MWD's aardig overeenkomen.

Voor de IJssel zijn de waarnemingen met betrekking tot de MGD's beperkter dan voor de Waal. Op basis van de beschikbare knelpuntinformatie blijkt dat de locaties van de berekende en waargenomen knelpunten weliswaar voor een belangrijk deel overeenkomen, maar dat er zeker ook verschillen zijn. Dit kan in veel gevallen worden teruggevoerd op lokale situaties die tot knelpunten leiden, maar waarvan de morfologische consequenties (veelal sterk 3-dimensionaal) in het 1-dimensionale model niet in voldoende detail kunnen worden weergegeven.

## 6.4 Berekend en geregistreerd onderhoudsbaggerwerk

### 6.4.1 Geregistreerd onderhoudsbaggerwerk

In paragraaf 6.2.1 is een kort overzicht gegeven van de registraties van het uitgevoerde baggerwerk in de Rijntakken. De gegevens met betrekking tot het geregistreerde baggerwerk op de Rijntakken in de periode 1900-2000 zijn beschikbaar in een database. Bij deze database kan het volgende worden opgemerkt:

- De database wordt beïnvloed door onvolledige en slechte registratie van het volume en de locatie waar het baggerwerk plaatsvond.
- Veel baggerwerk is niet gelokaliseerd. Voor de Waal is dat tenminste het geval in de periode voor 1970. Voor de IJssel geldt dit in de periode voor 1950.
- Over de hele registratieperiode is niet-gelokaliseerd baggerwerk op de Waal 4,4 keer groter dan gelokaliseerd baggerwerk. Na 1970 is nog steeds 47% van het baggerwerk niet gelokaliseerd.
- Over de hele registratieperiode is niet-gelokaliseerd baggerwerk op de IJssel 5 keer groter dan gelokaliseerd baggerwerk. Na 1950 is nog steeds 35% van het baggerwerk niet gelokaliseerd.

Door de matige registratie lijkt afleiden van de statistiek van geregistreerde baggervolumes een hachelijke zaak. In de volgende paragrafen is toch getracht met de beschikbare gegevens een vergelijking tussen gemeten en berekende baggervolumes te maken.

### 6.4.2 Overeenkomsten geregistreerd en berekend onderhoudsbaggerwerk

Voor de vergelijking van rekenresultaten met meetgegevens wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van meest recente baggergegevens (tenminste groot deel gelokaliseerd), een niet te



korte periode en een periode waarin het baggerwerk aanzienlijk was. De volgende perioden zijn gekozen:

- Waal: 1980-1996 (17 jr)
- IJssel: 1970-1985 (16 jr)

Uit de berekeningen kan het baggerwerk in twee vormen worden afgeleid:

- Het theoretische baggerwerk, hetgeen overeenkomt met de minimaal te baggeren hoeveelheid sediment (zie ook paragrafen 2.4.2 en 2.5.1).
- Het baggerwerk zoals dat in de berekeningen wordt toegepast. Aangezien dit baggerwerk een schijf betreft over de gehele sedimenttransporterende breedte, wordt dit beschouwd als een bovengrens van het baggerwerk (zie ook paragraaf 2.5.1).

Voor de vergelijking tussen gemeten en berekende volumes wordt met name gekeken of de baggerlocaties overeenstemmen en of de gemeten baggervolumes liggen tussen de bovengenoemde berekende onder- en bovengrens.

## Waal

Voor de hele Waal (t/m km 952) geldt voor het gemiddeld jaarlijkse baggerwerk in de periode 1980-1996:

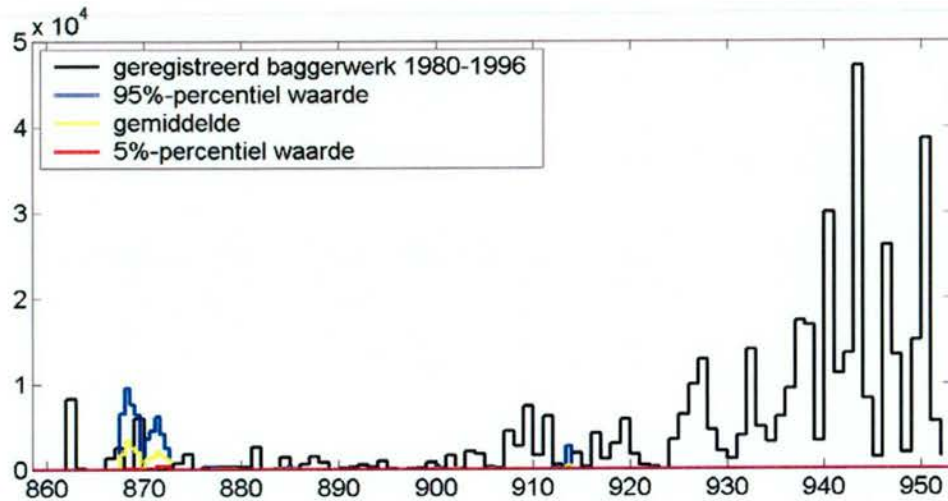
- 410.180 m<sup>3</sup>/jaar met locatie
- 364.230 m<sup>3</sup>/jaar niet gelokaliseerd

Voor de Waal t/m km 920 (in SOBEK-model wordt benedenstrooms gebaggerd/verfijnd om bodem stabiel te houden, dus vervuiling in vergelijking) geldt voor het gemiddeld jaarlijkse baggerwerk:

- 68.800 m<sup>3</sup>/jaar met locatie
- 61.000 m<sup>3</sup>/jaar niet gelokaliseerd (als dezelfde verhouding als voor hele Waal wordt gebruikt)

Een vergelijking tussen gelokaliseerd geregistreerd baggerwerk en berekende baggerwerk is gegeven in Figuur 6-20. Uit de figuur valt het volgende op:

- Zowel in de berekeningen als in werkelijkheid wordt gebaggerd in de Waalbochten bij Nijmegen.
- Uit metingen blijkt dat  $\frac{3}{4}$  van het baggerwerk plaatsvindt in de trajecten km 867-875 en km 905-920. Dit zijn tevens de trajecten waar in de modelberekeningen het meeste wordt gebaggerd (zie Figuur 5-2a). Voor die figuur geldt echter wel, dat in de berekeningen veel meer in het bovenstroomse traject wordt gebaggerd, terwijl in werkelijkheid vooral in het benedenstroomse traject wordt gebaggerd.
- Op de Middenwaal wordt in werkelijkheid wel gebaggerd, maar in de berekeningen nauwelijks. Dit is naar verwachting het gevolg van morfologische processen die met het 1-dimensionale model niet worden weergegeven (banken, beddingvormen).
- Benedenstrooms van km 915 wordt in werkelijkheid veel gebaggerd en in het rekenmodel niet. Het vele baggerwerk daar wordt in het rekenmodel gesimuleerd door vergroting van de transportcapaciteit door aanpassing van de korreldiameter en morfologische parameters (zie ook paragraaf 6.2.2).



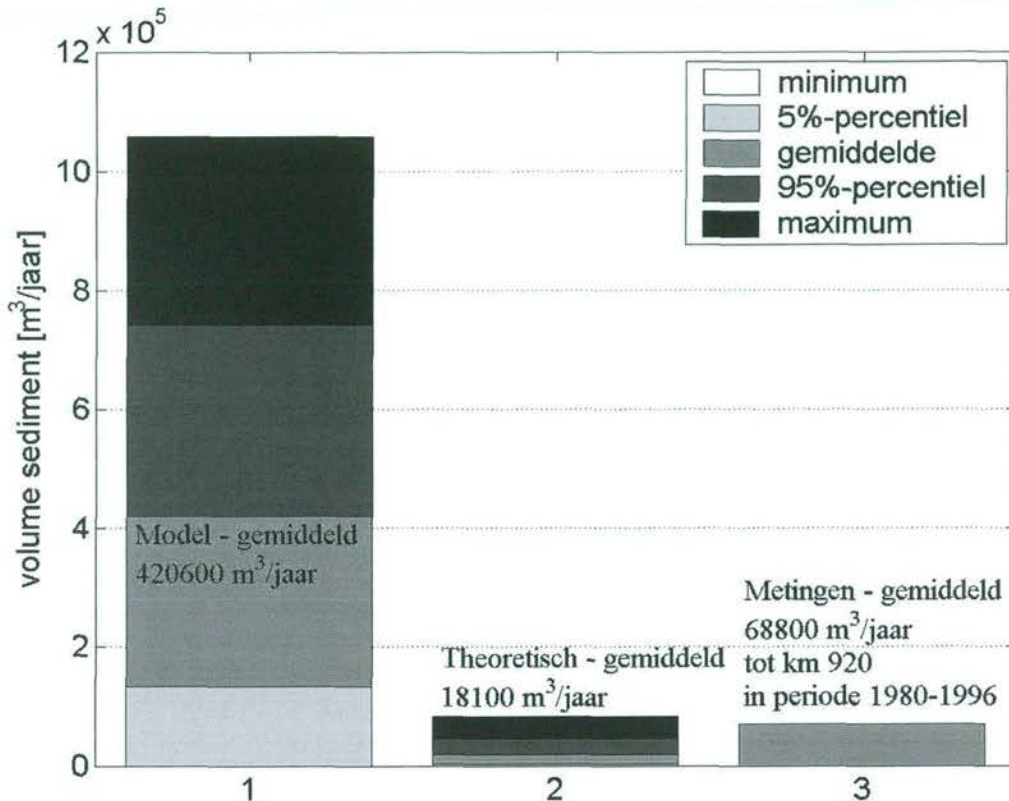
Figuur 6-20. Vergelijking berekende (theoretische volumes) en waargenomen jaarlijks baggervolume ( $m^3/jaar$ ) op de Waal per rivierlocatie

Met SOBEK wordt voor de Waal t/m km 920 een gemiddeld jaarlijks baggervolume (theoretische waarde) van  $18.100 m^3/jaar$  berekend. Als wordt uitgegaan van de bovengrens is dit  $420.600 m^3/jaar$ . In Figuur 6-21 worden deze waarden en de daarbij behorende betrouwbaarheidsband vergeleken met het waargenomen baggervolume. Daarbij is vooralsnog alleen uitgegaan van het gelokaliseerde baggerwerk.

Het volgende kan worden geconcludeerd:

1. Het gemeten baggerwerk ligt in tussen de (ruime) band van minimale (theoretische volume) en maximale verwachte baggervolume (volume in SOBEK-berekening) en (zoals verwacht) het dichtste bij het theoretische volume;
2. Het werkelijke gelokaliseerde baggerwerk is bijna 4 keer groter dan het theoretische baggerwerk. Indien ook het niet-gelokaliseerde baggerwerk van  $61.000 m^3/jaar$  wordt meegenomen is de verhouding ruim 7;
3. Het werkelijke gelokaliseerde baggerwerk is 6 keer kleiner dan het gemiddelde maximale baggervolume (uit de SOBEK-berekeningen). Als het niet-gelokaliseerde baggerwerk wordt meegenomen is die verhouding circa 3.





Figuur 6-21. Vergelijking berekende en waargenomen jaarlijks baggervolumes (m³/jaar) voor de gehele Waal

### IJssel

Voor de IJssel (tot km 1000) wordt uit de baggerdatabase voor de periode 1970-1985 gevonden:

- 111.507 m³/jaar met locatie
- 124.726 m³/jaar zonder locatie

Een vergelijking tussen het gelokaliseerde geregistreerde baggerwerk en het berekende baggerwerk is gegeven in Figuur 6-22. Uit de figuur valt het volgende op:

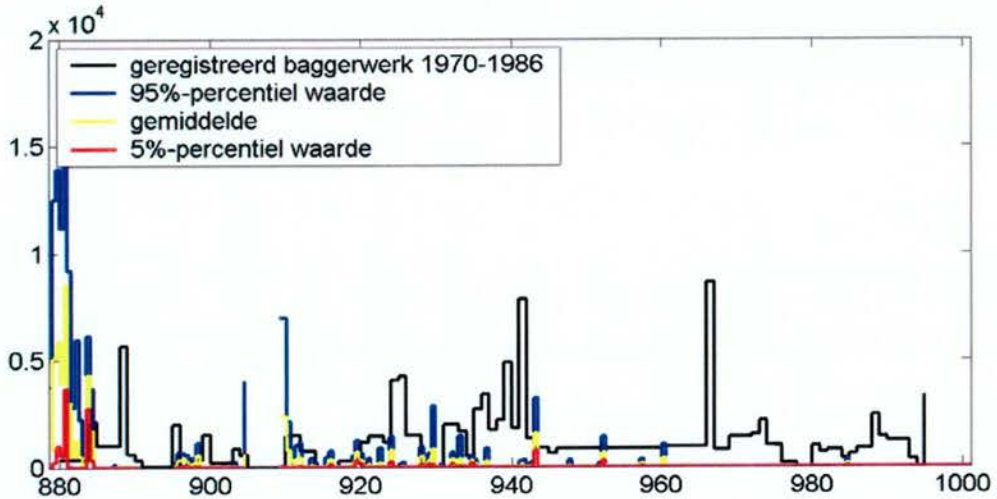
- uit de metingen blijkt dat ca ¼ van het baggerwerk plaatsvindt in de trajecten 880-890, 910-930 en 935-975. Uit de berekeningen (Figuur 5-2b) volgt dat het meeste baggerwerk plaatsvindt bovenstrooms (km 878-885) en vervolgens in mindere mate op het traject 910-960.
- Het baggerwerk is zowel in de metingen als de berekeningen gelijkmatiger over de rivier verdeeld dan op de Waal.

Met SOBEK wordt voor de IJssel een gemiddeld jaarlijkse baggervolume (theoretische waarde) van 51.600 m³/jaar berekend. Als wordt uitgegaan van de bovengrens is dit 479.600 m³/jaar. In Figuur 6-23 worden deze waarden en de daarbij behorende betrouwbaarheidsband vergeleken met het waargenomen baggervolume. Daarbij is vooralsnog alleen uitgegaan van het gelokaliseerde baggerwerk.

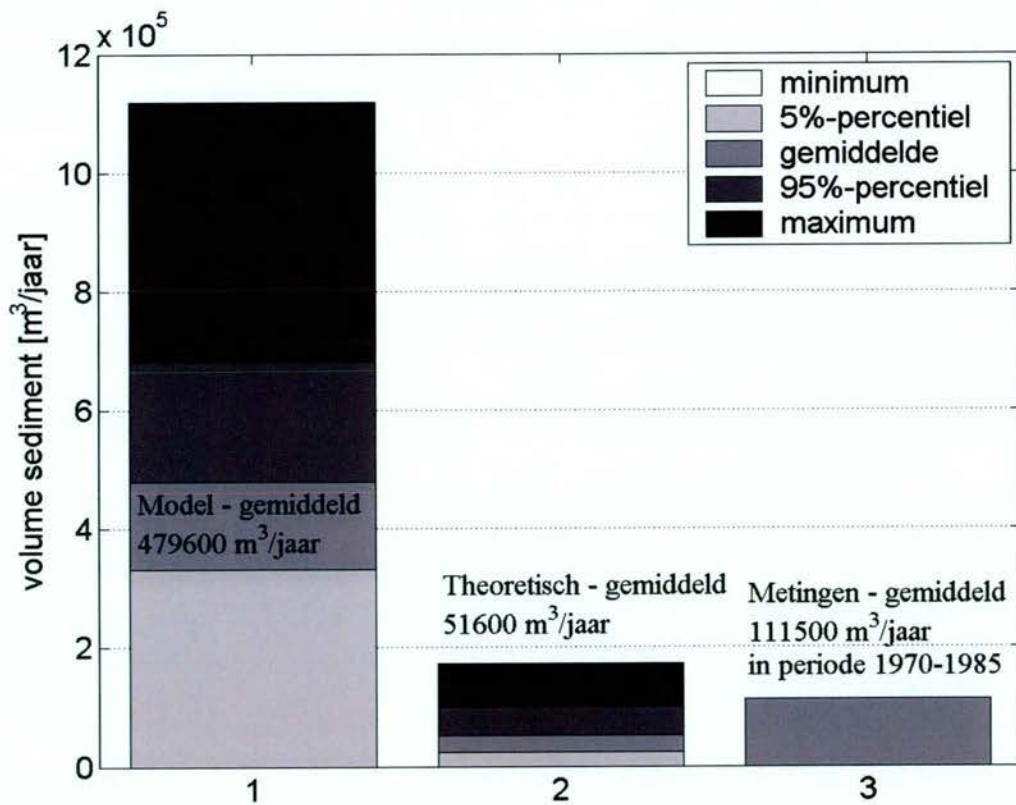
Het volgende kan worden geconcludeerd:

1. Het gemeten baggerwerk ligt in tussen de (ruime) band van minimale (theoretische volume) en maximale verwachte baggervolume (volume in SOBEK-berekening) en (zoals verwacht) het dichtste bij het theoretische volume;

2. Het werkelijke gelocaliseerde baggerwerk is ruim 2 keer groter dan het theoretische baggerwerk. Indien ook het niet-gelocaliseerde baggerwerk van bijna 125.000 m<sup>3</sup>/jaar wordt meegenomen, is de verhouding bijna 5;
3. Het werkelijke gelocaliseerde baggerwerk is 4 keer kleiner dan het gemiddelde maximale baggervolume (uit de SOBEK-berekeningen). Als het niet-gelocaliseerde baggerwerk wordt meegenomen is die verhouding circa 2.



Figuur 6-22. Vergelijking berekende (theoretische volumes) en waargenomen jaarlijks baggervolume (m<sup>3</sup>/jaar) op de IJssel per rivierlocatie



Figuur 6-23. Vergelijking berekende en waargenomen jaarlijks baggervolumes (m<sup>3</sup>/jaar) voor de gehele IJssel



### 6.4.3 Conclusies

Op basis van een vergelijking tussen berekende en gemeten baggervolumes voor Waal en IJssel wordt geconcludeerd:

1. De baggergegevens zijn te weinig gedetailleerd voor statistische analyses.
2. Werkelijke baggerhoeveelheden vallen binnen de minimale (theoretische) en maximale (1D modelbenadering) baggerhoeveelheden, en liggen het dichtst bij de theoretische volumes.
3. Door de oogzichten heen vertonen gemeten en voorspelde baggerlocaties overeenkomsten, al is de verdeling over de locaties wel verschillend.

### 6.5 Conclusies

Uit de vergelijking van de berekeningen met de metingen wordt geconcludeerd, dat de rekenresultaten voor de huidige situatie in belangrijke mate in lijn liggen met de beschikbare meetgegevens.

In detail kan het volgende worden geconcludeerd:

1. Voor de Bovenrijn en de Waal ligt de gemeten standaardafwijking van de bodemligging grotendeels binnen de betrouwbaarheidsband rond de berekende standaardafwijking. Grote afwijkingen tussen berekende en gemeten bodemvariatie kunnen worden verklaard door modelbeperkingen (splitsingspunt Pannerdense Kop, 'gevoelige' traject bij km 911-912 en discontinuïteit morfologische parameters bij km 915) en fysieke ingrepen die niet (of sterk geschematiseerd) in het rekenmodel zitten (baggerwerk, vaste lagen en bodemkribben).
2. Voor de IJssel kan worden gesteld dat de berekende bodemvariatie in de periode 1990-2000 goed vergelijkbaar is met de gemeten bodemvariatie, afgezien van de trajecten km 920-928, km 932-942, km 947-952 en km 985-995. De berekende bodemvariatie is op die trajecten kleiner dan gemeten. Zonder nader onderzoek kan niet worden gezegd of dit het gevolg is van de metingen of bewerking daarvan, eventueel uitgevoerd baggerwerk, modelbeperkingen of het niet beschouwen van andere (dan alleen de afvoer) onzekerheidsbronnen.
3. Indien voor de Waal de afgegeven MGD's worden vergeleken met de berekende MWD's (maatgevende waterdiepte), waarbij MWD's boven 5,2 m zijn uitgesloten en Waaltraject 2 niet wordt beschouwd, blijkt dat:
  - De MWD's gemiddeld gezien enigszins groter zijn dan de afgegeven MGD's. Dit is naar verwachting het gevolg van het niet kunnen modelleren van sterk 2- en 3-dimensionale patronen met het 1-dimensionale SOBEK-model;
  - De locaties van MGD's en MWD's aardig overeenkomen.
4. Voor de IJssel zijn de waarnemingen met betrekking tot de MGD's beperkter dan voor de Waal. Op basis van de beschikbare knelpuntinformatie blijkt dat de locaties van de berekende en waargenomen knelpunten weliswaar voor een belangrijk deel overeenkomen, maar dat er zeker ook verschillen zijn. Dit kan in veel gevallen worden teruggevoerd op lokale situaties die tot knelpunten leiden, maar waarvan de morfologische consequenties (veelal sterk 3-dimensionaal) in het 1-dimensionale model niet in voldoende detail kunnen worden weergegeven.
5. De baggergegevens zijn te weinig gedetailleerd voor statistische analyses.
6. Werkelijke baggerhoeveelheden voor zowel Waal als IJssel vallen binnen de minimale (theoretische) en maximale (1D modelbenadering) baggerhoeveelheden, en liggen het dichtst bij de theoretische volumes.
7. Door de oogzichten heen vertonen gemeten baggerlocaties en modellocaties overeenkomsten, al is verdeling over locaties wel verschillend.



## 7 Conclusies en aanbevelingen

In de studie is een methodiek ontwikkeld waarmee bevaarbaarheid van en onderhoudsbaggerwerk (inclusief terugstorten) op de Bovenrijn, Waal en IJssel statistisch kunnen worden bepaald. In de studie zijn Nederrijn en Lek niet meegenomen, aangezien de rekentijden daardoor te groot zouden worden.

Het afvoerverloop is in de studie als onzekerheidsbron meegenomen en bij de bepaling van bevaarbaarheid en baggerwerk is rekening gehouden met een theoretisch bepaald dwarsverhang in rivierbochten. Door uitvoering van 400 berekeningen (Monte Carlo simulatie) met evenzoveel, via Bootstrap resampling gegenereerde, afvoerverlopen, zijn verwachtingswaarde en betrouwbaarheidsband van bodemligging, bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk bepaald.

In de studie zijn naast de uitgangssituatie twee RvdR-alternatieven beschouwd, te weten het budget basisalternatief en ruimtelijk basisalternatief.

Hieronder worden de conclusies van de studie toegelicht en de daaruit volgende aanbevelingen benoemd.

### 7.1 Conclusies

#### De methodiek

1. De stochastische benadering maakt duidelijk, dat er veel verschillende morfologische reacties mogelijk zijn, en ook op welke locaties de grootste onzekerheid in de uitkomst te verwachten is. Zoals verwacht spelen hierbij bestaande of geïntroduceerde variaties in ruimtelijke riviergeometrie een belangrijke rol.
2. De rivierverruimende maatregelen van de basisalternatieven kunnen lokaal leiden tot grote sedimentatie en erosiepatronen en een versterkte bodemvariatie. Als gevolg hiervan kunnen sommige locaties zich ontwikkelen tot mogelijke nautische knelpunten in de rivier. Bovendien kunnen zij leiden tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk in de rivier. Dit resulteert in hogere onderhoudskosten en tot meer overlast voor de scheepvaart. Andersom kunnen maatregelen de bevaarbaarheid uiteraard ook verbeteren.

#### De bevaarbaarheid

1. Voor de uitgangssituatie blijkt dat:
  - a. met name de locaties met de kleinste bochtstralen voor de scheepvaartbeperkingen zorgen. De kans dat op deze locaties de maatgevende waterdiepte in een bepaald riviertraject wordt bepaald is groot.
  - b. Waaltraject 2 tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen (km 867-887) van de Waaltrajecten het slechtst voldoet aan de gestelde bevaarbaarheidseisen. Op de Bovenrijn wordt wel aan de OLA-scheepvaarteis voldaan en de Waaltrajecten 3 en 4 (km 887-953) zijn redelijk goed bevaarbaar, maar voldoen net niet aan de OLA-scheepvaarteis.
  - c. op de IJssel op alle trajecten niet aan de OLA-scheepvaarteis wordt voldaan. Dit komt deels door het feit dat de IJssel niet is meegegroeid met de enorme schaalvergroting die in de scheepvaartsector heeft plaatsgevonden. Anderzijds zorgen de rivierbochten met een kleine bochtstraal voor scheepvaarthinder. De bovenstroomse trajecten zijn het minst goed bevaarbaar.
2. Voor de RvdR-alternatieven wordt het volgende gevonden:
  - a. het ruimtelijk alternatief leidt op Waaltraject 4 (km 913-953) tot een duidelijke verslechtering van de bevaarbaarheid. Bovendien wordt een verschuiving van de knelpuntlocaties voorspeld. De kans op een maatgevende waterdiepte op de locaties



- waar grootschalig wordt ingegrepen (km 885-890 op Waaltraject 3 en km 929-933 op Waaltraject 4) wordt groter.
- b. het budgetalternatief heeft nauwelijks effect op de bevaarbaarheid van de Bovenrijn en de Waal.
  - c. het ruimtelijke en budgetalternatief leiden voor de IJssel tot vergelijkbare effecten op de bevaarbaarheid.
    - i) de bevaarbaarheid op het benedenstroomse gedeelte van de IJssel (traject 4 - km 971-1000) neemt door de zomerbedverdieping enorm toe.
    - ii) De waterstandsverlaging bovenstrooms van dit traject als gevolg van de zomerbedverdieping zorgt voor een verslechtering van de bevaarbaarheid op IJsseltraject 3 (km 950-971).
    - iii) Een kleine verschuiving van de locaties waarop de maatgevende waterdiepte wordt berekend is te zien op IJsseltraject 4. De kans op een maatgevende waterdiepte direct bovenstrooms van de zomerbedverdieping (km 971-975) neemt toe.
    - iv) De bevaarbaarheid op de IJssel tussen de IJsselkop en km 950 wordt nauwelijks beïnvloed door de rivierverruimende maatregelen.

### Onderhoudsbaggerwerk en effecten op bevaarbaarheid

1. Met de methodiek voor bepaling van het onderhoudsbaggerwerk blijkt dat het ruimtelijk basisalternatief ten opzichte van de uitgangssituatie op Bovenrijn, Waal en IJssel tot ruim 11% meer baggerwerk leidt. Voor het budget basisalternatief neemt het baggerwerk gemiddeld juist met 12% af.
2. De bandbreedte voor het jaarlijkse baggerwerk neemt in het ruimtelijk basisalternatief licht toe en in het budget basisalternatief flink af ten opzichte van de uitgangssituatie.
3. Het gebaggerde sediment wordt teruggestort op een bovenstroomse locatie die minimaal 1,5 km bovenstrooms ligt van de baggerlocatie. De transportafstanden op de IJssel zijn voor alle drie de situaties (uitgangssituatie en twee basisalternatieven) belangrijk groter dan op de Waal.
4. De bagger- en teruggestortstrategie leidt voor de drie situaties overwegend wel tot een verbetering van de bevaarbaarheid. De beoogde en verwachte grote toename wordt echter niet gehaald. Op de Waal neemt de bevaarbaarheid zelfs wat af op traject 2 (Waalbochten). Verklaringen voor de tegenvallende bevaarbaarheidsverbetering zijn:
  - a. de 1-dimensionale benadering leidt er toe dat baggerwerk over de gehele sedimenttransporterende breedte moet worden uitgevoerd. Dit is een overschatting. Om niet nog meer te overschatten is geen rekening gehouden met een te baggeren overdiepte. Een baggerlocatie kan zodoende weer snel een knelpunt worden;
  - b. bij de teruggestortstrategie wordt bij voorkeur gestort in het traject 1,5-5 km bovenstrooms van de baggerlocatie. Op een traject met veel baggerlocaties is het mogelijk dat direct bovenstrooms van een andere baggerlocatie wordt teruggestort. Dit sediment kan dan weer snel tot een nieuw knelpunt leiden;
  - c. Als gevolg van teruggestorten bovenstrooms wordt als het ware een deel van het sedimenttransport in het systeem rondgepompt. Hierdoor neemt het verhang tussen baggerlocatie en bovenstroomse teruggestortlocatie wat toe en de bijbehorende waterdiepte wat af. Dit betekent dat in dit traject de bodem wat omhoog zal komen (gunstig voor tegengaan autonome bodemdaling), maar de beschikbare vaardiepte wat zal afnemen, hetgeen uiteraard ongewenst is.
  - d. De overschatting van het baggervolume leidt ook tot een overschatting van het teruggestortvolume. Hierdoor worden de bovenstaande effecten b. en c. verder versterkt.
5. De bevaarbaarheid na baggerwerk is voor de uitgangssituatie minder dan voor de twee basisalternatieven op de trajecten Waal3, IJssel1, IJssel2 en IJssel4. De zomerbedverdieping op IJssel4 in beide basisalternatieven verklaart de verschillen op dat traject.
6. Bovengenoemd verschil in bevaarbaarheid na baggerwerk zal ertoe leiden dat het voorspelde baggervolume in de uitgangssituatie naar verwachting nog wat groter zal



worden. Verschil tussen uitgangssituatie en ruimtelijk basisalternatief wordt daardoor wat kleiner en tussen uitgangssituatie en budget basisalternatief wat groter.

### Vergelijking metingen en berekeningen voor uitgangssituatie

1. Uit de vergelijking van de berekeningen met de metingen van bodemligging, MGD's en baggervolume's wordt geconcludeerd, dat de rekenresultaten voor de huidige situatie in belangrijke mate overeenkomst vertonen met de beschikbare meetgegevens.
2. Voor de Bovenrijn en de Waal valt de gemeten standaardafwijking van de bodemligging grotendeels binnen de betrouwbaarheidsband rond de berekende standaardafwijking. Grote afwijkingen tussen berekende en gemeten bodemvariatie kunnen worden verklaard door modelbeperkingen (splitsingspunt Pannerdense Kop, 'gevoelige' traject bij km 911-912 en discontinuïteit morfologische parameters bij km 915) en fysieke ingrepen die niet (of sterk geschematiseerd) in het rekenmodel zitten (baggerwerk, vaste lagen en bodemkribben).
3. Voor de IJssel kan worden gesteld dat de berekende bodemvariatie in de periode 1990-2000 goed vergelijkbaar is met de gemeten bodemvariatie, afgezien van de trajecten km 920-928, km 932-942, km 947-952 en km 985-995. De berekende bodemvariatie is op die trajecten kleiner dan gemeten. Zonder nader onderzoek kan niet worden gezegd of dit het gevolg is van de metingen of bewerking daarvan, eventueel uitgevoerd baggerwerk, modelbeperkingen of het niet beschouwen van andere (dan alleen de afvoer) onzekerheidsbronnen.
4. Indien voor de Waal de afgegeven MGD's worden vergeleken met de berekende MWD's (maatgevende waterdiepte), waarbij MWD's boven 5,2 m zijn uitgesloten en Waaltraject 2 niet wordt beschouwd, blijkt dat:
  - De MWD's gemiddeld gezien enigszins groter zijn dan de afgegeven MGD's. Dit is naar verwachting het gevolg van het niet kunnen modelleren van sterk 2- en 3-dimensionale patronen met het 1-dimensionale SOBEK-model;
  - De locaties van MGD's en MWD's aardig overeenkomen.
5. Voor de IJssel blijkt dat op basis van de beschikbare knelpuntinformatie de locaties van de berekende en waargenomen knelpunten weliswaar voor een belangrijk deel overeenkomen, maar dat er zeker ook verschillen zijn. Dit kan in veel gevallen worden teruggevoerd op lokale situaties die tot knelpunten leiden, maar waarvan de morfologische consequenties (veelal sterk 3-dimensionaal) in het 1-dimensionale model niet in voldoende detail kunnen worden weergegeven.
6. De baggergegevens zijn te weinig gedetailleerd voor statistische analyses.
7. Werkelijke baggerhoeveelheden voor zowel Waal als IJssel vallen binnen de minimale (theoretische) en maximale (1D modelbenadering) baggerhoeveelheden, en liggen het dichtst bij de theoretische volumes.
8. Door de oogharen heen vertonen gemeten en voorspelde baggerlocaties overeenkomsten, al is verdeling over locaties wel verschillend.

## 7.2 Aanbevelingen

De resultaten van de studie geven aanleiding tot de volgende aanbevelingen:

### Methodiek

1. Knelpunten treden in de huidige analyse vaak op in scherpe bochten. Dit is het gevolg van de correctie van de vaardiepte op basis van een berekend evenwichtsdwarsverhang. De geldigheid van deze correctie en gevoeligheid van bevaarbaarheid daarvoor zouden nader moeten worden onderzocht.
2. De invloed van andere (dan de afvoer) onzekerheidsbronnen zou onderzocht moeten worden.
3. De Nederrijn en Lek zijn in de huidige studie niet meegenomen. Dit zou alsnog kunnen worden gedaan.



**Baggeren en terugstorten:**

1. In de 1-dimensionale benadering moet noodgedwongen over de gehele sedimenttransporterende breedte worden gebaggerd, waardoor het baggervolume wordt overschat. Om de bodemdaling te beperken wordt het gebaggerde sediment bovenstrooms teruggestort. Ook dit volume wordt dus overschat. Een 2-dimensionale benadering waarbij selectief in een dwarsprofiel gebaggerd en teruggestort kan worden is nodig om de effecten van deze overschatting te bepalen.
2. In praktijk zal worden teruggestort in diepe buitenbochten en in diepe delen rond kribkoppen. Bij de 1D-benadering die in dit onderzoek wordt toegepast wordt het stortvolume over de sedimenttransporterende breedte uitgespreid. Hierdoor zal het teruggestorte sediment zich sneller in benedenstroomse richting voortplanten dan in werkelijkheid het geval zal zijn. De baggerproblematiek vraagt dan ook om een 2-dimensionale analyse.
3. In de gehanteerde terugstortstrategie kan direct bovenstrooms van een baggerlocatie weer worden teruggestort. Hierdoor ontstaat daar snel weer een knelpunt. Om deze nadelen van de terugstortstrategie te vermijden zou de baggerstrategie geoptimaliseerd moeten worden. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het definiëren van bagger- en stortlocaties, zodat storten zeer dicht bij een baggerlocatie wordt voorkomen.
4. Tevens kan door het zogenaamde rondpompen van gebaggerd sediment het bodemverhang lokaal toenemen en de waterdiepte afnemen. Ook hier zou een optimalisatie van de baggerstrategie onderzocht moeten worden zoals:
  - a. Al het gebaggerde sediment veel verder bovenstrooms terugstorten om de lokale waterdieptereductie door steiler bodemverhang te voorkomen.
  - b. Benedenstrooms terugstorten, al is dit voor het reduceren van de bodemdaling minder effectief.

## 8 Referenties

- Breen, L. van, Vuren, S. van, en Havinga, H., 2003. Stochastisch model berekent effect van lagere uiterwaarden. In: *Land en Water*, nr 3, p.30-33.
- De Vries, M., 1975. A morphological time-scale for rivers. In: *Proceedings 16<sup>th</sup> Congress*. IAHR, São Paulo, Vol. 2, paper B3, pp. 17-23, also DHL publication. No. 147.
- Efron, B., 1982. *The Jackknife, the Bootstrap, and other resampling plans*. Society for Industrial and Applied Mathematics. ISBN 0-89971-179-7. Philadelphia publisher, 92 pp.
- Hammersly, J.M. and Handscomb, D.C., 1964. *Monte Carlo Methods*. Methuen & Co Ltd., Londen.
- Jesse, P. and Kroekenstoel, D.F., 2001. *1-D Morfologisch model Rijntakken*. RIZA rapport 2001.040. ISBN 9036953952. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- Kroekenstoel, D.F., 2004. Memo - Morfologische berekeningen t.b.v. PKB Ruimte voor de Rivieren. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.
- RIZA, 2004. Achtergrond document morfologische effecten PKB alternatieven (in voorbereiding)
- Sieben, A., 2004. *Memo 2004-016. Morfologische PKB effecten BOR*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat.
- Sloff, C.J., E. Mosselman en A.P.P. Termes, 2002. Planstudie Boven-IJssel – Rivierkarakteristieken en scheepvaartknelpunten. Februari 2002.
- Smienk, H, 2003. *Bevaarbaarheidsanalyse van de IJssel*. Afstudeerverslag. Sectie Waterbouwkunde, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft.
- Stolker, C., 2003. *Projectnota vaarwerverruiming Boven-IJssel ON-1597*. Bepaling Nautische Knelpunten. WL | Delft Hydraulics.
- Struijk, A.J., 1993. *Planstudie IJssel - Scheepvaart - Verkennend onderzoek*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland.
- Stuurman, P.M. & Koolwijk, J., 2003. *OLR-2002 - Bepaling Overeengekomen Lage rivierstand 2002 voor de Nederlandse Rijntakken*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Oost Nederland.
- Talmon, A.M., Van Mierlo, M.C.L.M. & Struiksma, N., 1995. Laboratory measurements of the direction of sediment transport on tranverse alluvial-bed slopes. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, no. 4. p. 495-517.
- Van der Klis, H., 2000. Stochastic modelling of river morphology: a case study. In: *Stochastic Hydraulics 2000*, Wang & Hu (eds). Balkema Rotterdam ISBN 90 5809 166x. p. 109-116.
- Van der Klis, H., 2003. *Uncertainty Analysis applied to Numerical Models of River Bed Morphology*. Ph.D. thesis. Delft University of Technology, ISBN 90-407-2440-7, Delft, the Netherlands.
- Van Vuren, S. & Van Breen, L.E., 2003. Morphological impact of floodplain lowering along a low-land river: a probabilistic approach. In: *Proceedings of the XXX IAHR Congress, August 2003, Thessaloniki, Greece - Theme D Hydroinformatics and advanced data technology in engineering practice*, edited by Korfiatis, G. & Christodoulou, G., ISBN 960-243-598-1, p.191-200.



- Van Vuren, S., 2003. Sensitivity and Uncertainty analysis of the SOBEK Rhine branches model. Concept-rapport Technische Universiteit Delft.
- Van Vuren, S., de Vriend, H.J., Ouwerkerk, S. & Kok, M., 2004. Stochastic modelling of the impact of flood protection measures along the river Waal in the Netherlands. *Journal of Natural Hazards*. submitted and accepted.
- Van Vuren, S., Kok, M. & Ouwerkerk, S.J., 2003. Impact of river morphology on extreme flood level prediction: a probabilistic approach. In: *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2003*, June 2003, Maastricht, the Netherlands, Volume 2. ISBN 190 5809 595 9, p.1653-1662.
- Van Vuren, S., Van der Klis, H. & De Vriend, H., 2002. Large-scale floodplain lowering along the River Waal: a stochastic prediction of morphological impacts. In: *Proceedings of River Flow 2002 - Volume 2*, edited by D. Bousmar & Y. Zech. A.A. Balkema Publishers. ISBN 905809 509 6. p. 903-912.
- Vries, M. de, 1984. Vloeistofmechanica, handleiding college b71N, TU Delft, juli 1984.
- WL-Delft Hydraulics, 2001. *SOBEK River Estuary, User manual. Technical report*. WL | Delft Hydraulics.

## Bijlagen



## Bijlage 1: Rivierverruimende maatregelen per inrichtingsalternatief

Riviertraject	Km	Budgetalternatief	Ruimtelijk alternatief
Waal 1 <i>km 858-867</i>		Voor het gebied tussen Tolkamer en de Kandiakade bij Pannerden is eind jaren negentig het plan Rijnwaarden ontwikkeld. Met de uitvoering dit plan wordt voldoende ruimte voor de rivier gecreëerd voor dit traject. Aanvullende maatregelen zijn op dit traject niet noodzakelijk.	
Waal 2 <i>km 867-887</i>	867-874	Millingerwaard: afgraven hoogwatervrije terrein; afgraven van 3 kades; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot dynamische ruigte; Kaliwaal verondiepen.	
	878-880	Lopend /recent uitgevoerd project: Bemmelsche Waarden.	
	884-885	grootschalige dijkverlegging Veur-Lent (plan Brokx, 50009)	
	887-915	kribverlaging op traject Midden-Waal	
	886-888		Oosterhoutse weilanden: graven nevengeul; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; verondiepen waterplas.
Waal 3 <i>km 887-913</i>	915-934	kribverlaging op traject Waal omgeving St. Andries	
	887-891	Moespotsche Waard: graven nevengeul; afgraven maaiveld en ontwikkelen natuurgrasland afgraven kades; stroomlijnen hoogwatervrije terreinen; verondiepen waterplas.	
	890		verwijderen steenfabriek Beuningen.
	899-903	Lopend /recent uitgevoerd project: Afferdensche en Deetsche Waarden.	
	902-906	Ochtensche buitenpolder: dijkverlegging; graven oevergeul; verwijderen hoogwatervrije terrein; aanleg stangen; verlagen zomer- en dwarskades, afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuur.	
	903-907		Drutense waarden oost: stroomlijnen hoogwatervrije terreinen; graven oever- en nevengeulen; verlagen zomerkade; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuur
Waal 4 <i>km 913-953</i>	934-953	kribverlaging op traject Beneden-Waal	
	911-917		Wamelsche Uiterwaard en Dreumelsche Waard noord: maaiveldverlaging met natuurontwikkeling; graven van strang; verwijderen deel zomerkade; verlagen overige deel zomerkade veerweg verlagen of doorlaatbaar maken; verwijderen vervuilde hoge terreinen.
	914	Lopend /recent uitgevoerd project: Kleine Willemspolder.	
	918-921	Dreumelsche Waard-Zuid: afgraven maaiveld met natuurontwikkeling; vergroten strangen.	
	916-917	Lopend /recent uitgevoerd project: Passewaay.	
	924-931		Lopend /recent uitgevoerd project: Heesseltsche uiterwaarden

Riviertraject	Km	Budgetalternatief	Ruimtelijk alternatief
	929-932		Lopend /recent uitgevoerd project: Hurwenensche uiterwaarden.
	933-935	Zaltbommel: afgraven hoogwatervrije terrein en ontwikkelen tot natuur grasland.	
	936-939	Lopend /recent uitgevoerd project: Gamerensche waard.	
	937-941		Crobsche waard: afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuur grasland; plassen verbinden tot strang; verondiepen plassen; verlagen en doorlaatbaar maken kades; verplaatsen strangopening.
	939-942	Lopend /recent uitgevoerd project: Breemwaard.	
	941-943		Herwijnsche bovenwaard: graven strang; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot dynamische ruigte; verlagen of verwijderen kades.
	943-946		Ruyterwaard: afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuur grasland; graven langgerekte plas; verwijderen of verlagen kades bij fabriek; doorlaatbaar maken veerweg moerasontwikkeling
	948-951	Brakelsche Benedenwaarden en Munnikenland: dijkverlegging; graven nevengeul; ontwikkelen moeras en dynamische ruigte; aanleg open water.	
	947-950	Lopend /recent uitgevoerd project: Loevestein.	
	953-861	Natuurgebied Avelingen maximaal	

*Tabel B.1-1: rivierverruimende maatregelen voor de inrichtingsalternatieven, Budgetalternatief en Ruimtelijk alternatief voor de Bovenrijn en de Waal.*



Riviertraject	Km	Budgetalternatief	Ruimtelijk alternatief
IJssel 1 <i>km 878-905</i>	979-905	Op dit traject is het niet noodzakelijk rivierverruimende maatregelen te treffen aangezien op dit traject de dijken aan weerskanten van de rivier al voldoende hoog en sterk zijn.	
IJssel 2 <i>km 905-950</i>	904-915	Olburgsche waard en Spaensweerd: zomerkades verlagen, doorlatend maken veendam, afgraven maaiveld met behoud van landbouwfunctie, verondiepen en verkleinen waterplassen.	
	910-919		Brummensche waard: afgraven maaiveld met behoud van landbouwfunctie, zomerkades verlagen, kade Grote Beek verlagen, Bosontwikkeling (in stroomluwe delen)
	927	Lopend /recent uitgevoerd	project: Zutphen
	911-943		kribverlaging op traject Midden IJssel
	931-935		Rammelwaard: kleinschalige dijkverlegging; graven strang; kades verlagen; verondiepen waterplas.
	931-935		Rijsselsche waard: graven strangen; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; kades verlagen.
	938-943		Epsweerden polder: graven strangen; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; verondiepen waterplassen.
	940-944		Epe- en Bokkenwaard: graven strang; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; zomerkades verlagen; verondiepen waterplassen; uitmonding Schipbeek via waterplassen; bosontwikkeling.
	936-946		Wilpsche klei, Bolwerksweise en Ossenwaard: aanleg groene rivier; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot dynamische ruigte; zomerkades verlagen; zomerkades aanleggen.
	943-964		kribverlaging op traject Sallandse IJssel, zuidelijk deel
943-946		Ossenwaard: zomerbedverbreding; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot dynamische ruigte; zomerkade verplaatsen.	
IJssel 3 <i>km 950-971</i>	948-952		Keizers- en Slobbenwaard: afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; graven strang; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot moeras; kades verwijderen; bos verwijderen; bosontwikkeling.
	947-951		Terwolderdorpen-waarden graven strangen; gedeeltelijk afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; bosontwikkeling; kades langs uitmonding toevoerkanaal verwijderen.
	951-957	Olsterwaarden: afgraven maaiveld met behoud landbouwfunctie.	

Riviertraject	Km	Budgetalternatief	Ruimtelijk alternatief
	955-957	Welsumvelder buitenwaarden: graven strang; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot moeras; bebouwing verwijderen.	
	955-957	Lopend /recent uitgevoerd project: Welsumerwaarden	
	964-974		kribverlaging op het traject Sallandse IJssel, noordelijk deel
	966-970	Marlenwaarden: afgraven maaiveld met behoud landbouwfunctie.	
	959-964	Lopend /recent uitgevoerd project: Duursche waarden en Fortmond	
	965-969	Wijher buitenwaarden: graven nevengeul; verondiepen waterplassen; kade verlagen; kleinschalige dijkverlegging.	
	965	De paddenpol: kleinschalige dijkverlegging.	
	968-972	Herxer uiterwaarden: afgraven maaiveld met behoud landbouwfunctie.	
	970	Werven: kleinschalige dijkverlegging.	
IJssel 4 km 971- 1001	972	Hoog gebied beneden Het oever doorsteken: Hoog gebied benedenstrooms Het oever doorsteken tot aan de Botten strank.	
	975- 1001	Zomerbedverlaging	
	978-984	Gelderdijkse waard en Bentinkswellen: graven strang; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; afgraven maaiveld en ontwikkelen tot moeras; bebouwing verwijderen.	
	987-991	Lopend /recent uitgevoerd project: Vreugderijkerwaard.	
	979	Landhoofd oude IJsselbrug oost (Zwolle) en west: het landhoofd van de IJsselbrug bij Zwolle op de rechter en linkeroever van de IJssel wordt doorlatend gemaakt.	
	981-982	Scherenwelle en Koppelenwaard: afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; afgraven maaiveld met behoud landbouwfunctie; kade verlagen.	
	991-994	De Naters: kleinschalige dijkverlegging; graven strang.	
	990-993		Onderdijksche waard: afgraven maaiveld en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; graven strang; verondiepen waterplassen en ontwikkelen tot natuurlijk grasland; verondiepen waterplassen en ontwikkelen tot strang.

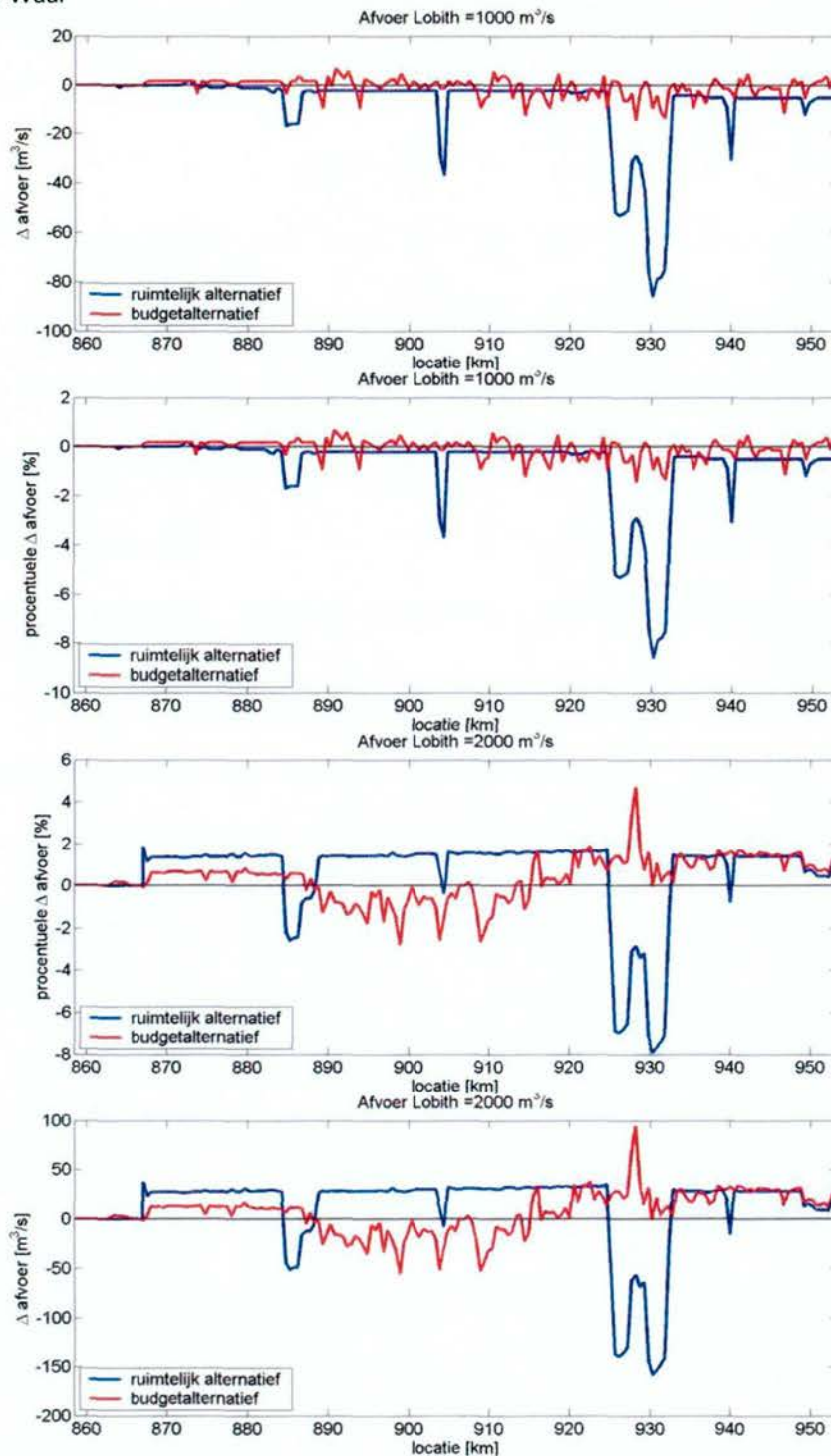
Tabel B.1-2: rivierverruimende maatregelen voor de inrichtingsalternatieven, Budgetalternatief en Ruimtelijk alternatief voor de IJssel.



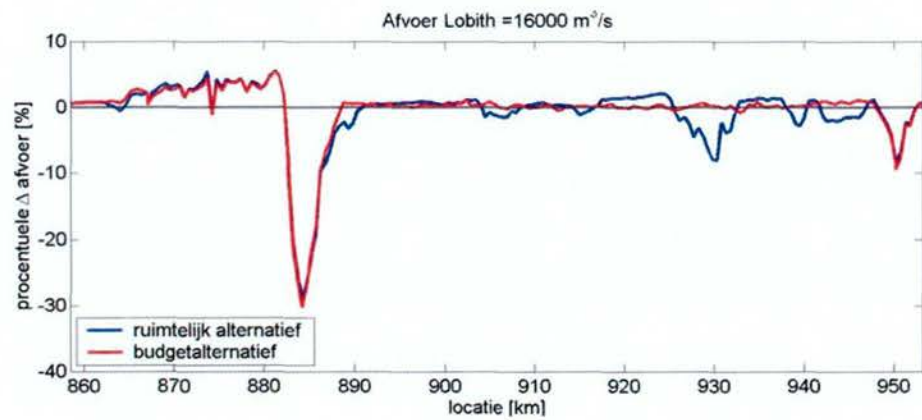
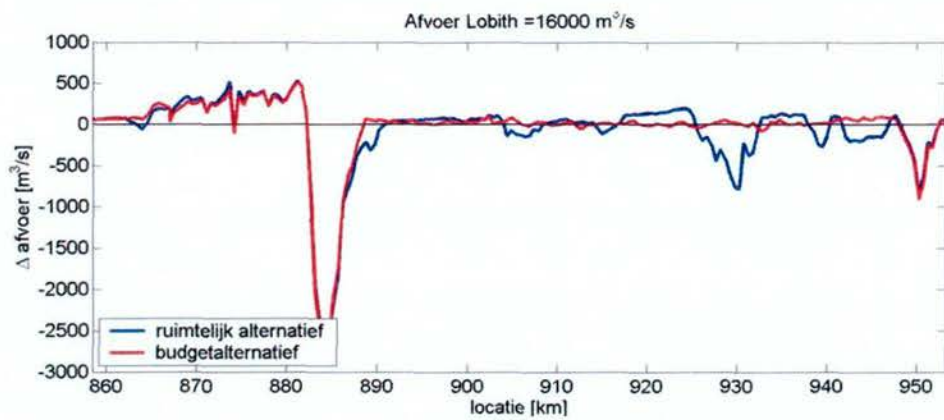
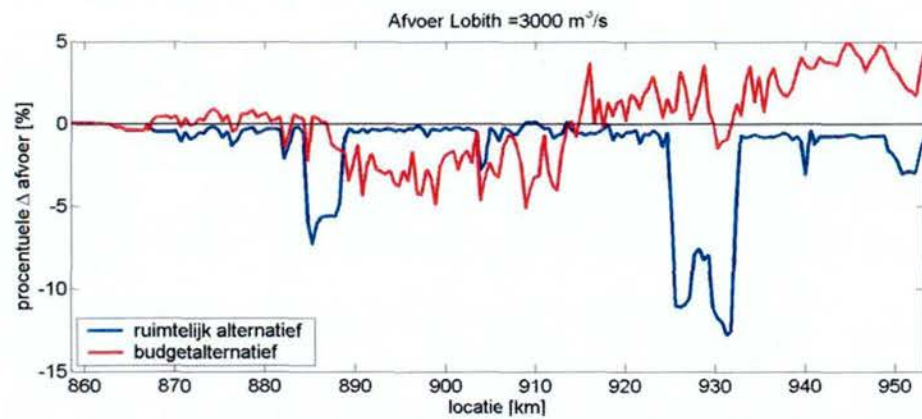
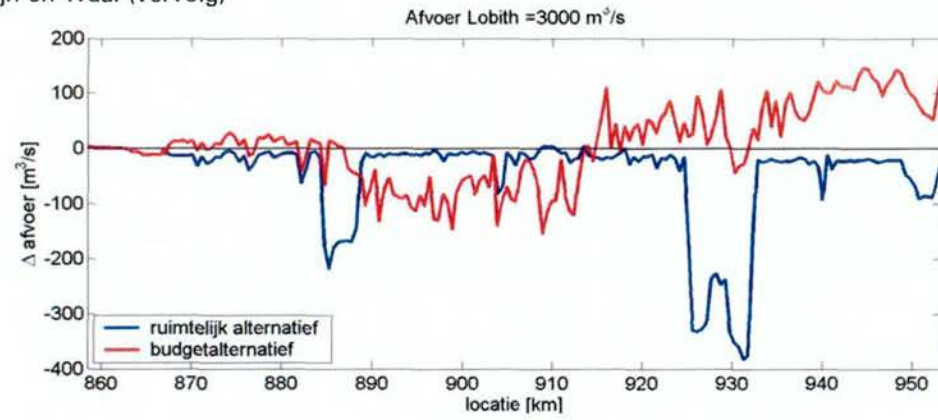
## Bijlage 2: Verandering afvoerverdeling op Rijntakken

Absolute en procentuele verandering hoofdgeulafvoer op (a) Bovenrijn en Waal en (b) de IJssel t.o.v. uitgangssituatie door het ruimtelijke en budgetalternatief bij afvoeren van 1.000, 2.000, 3.000 en 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith

a. Bovenrijn en Waal

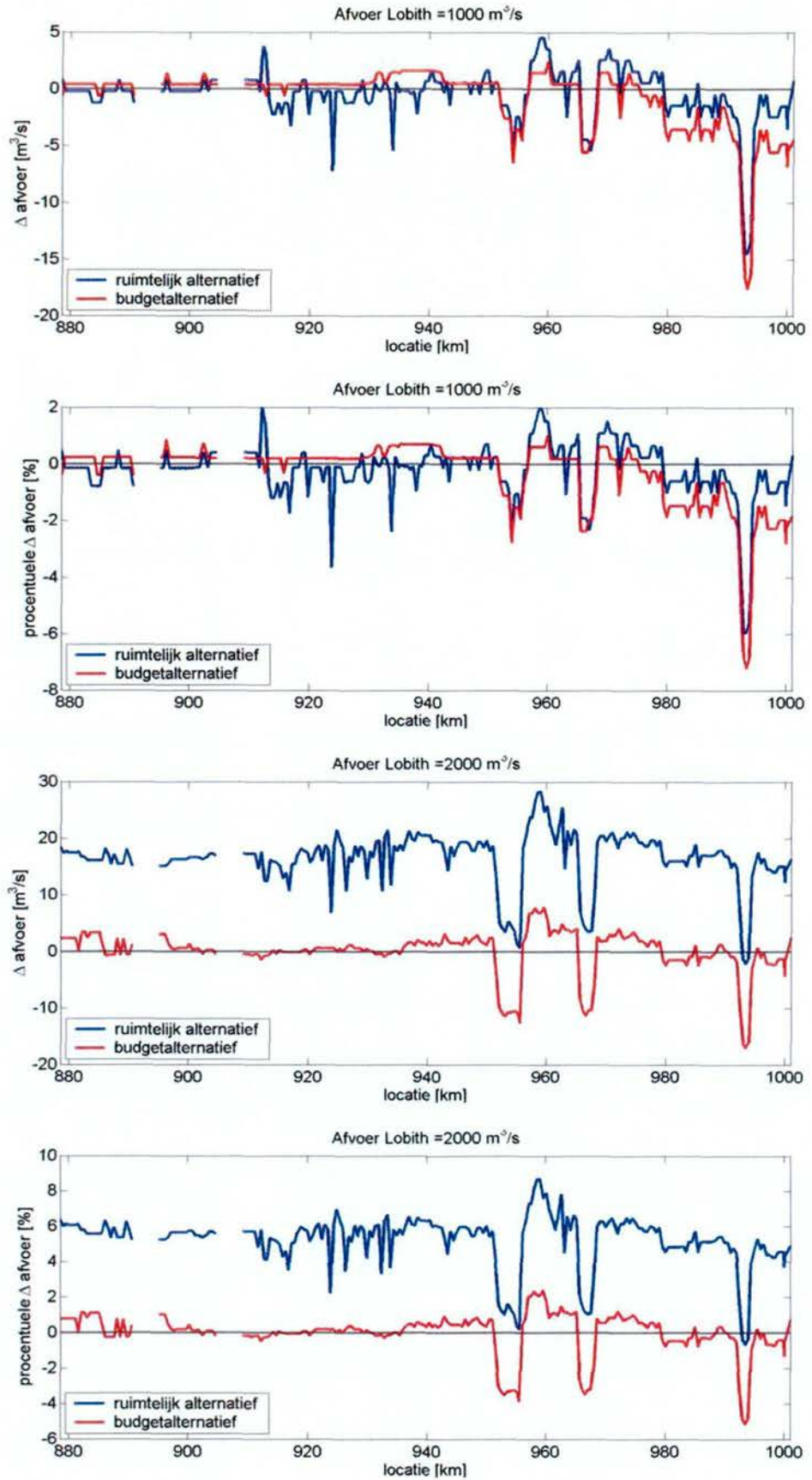


a. Bovenrijn en Waal (vervolg)

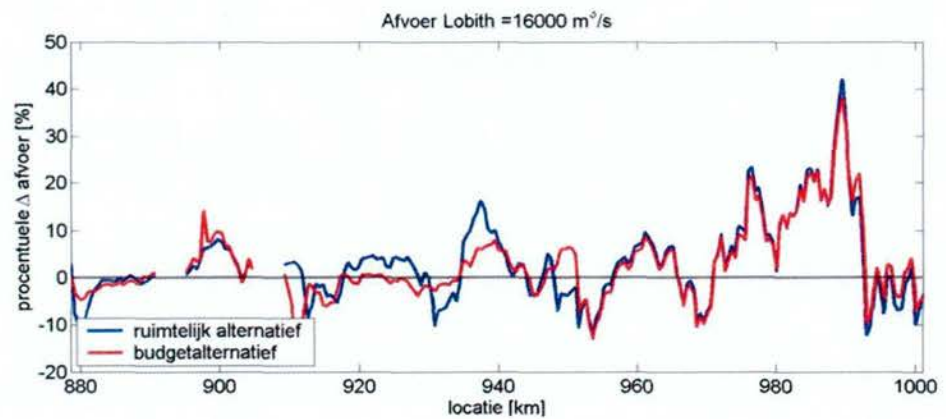
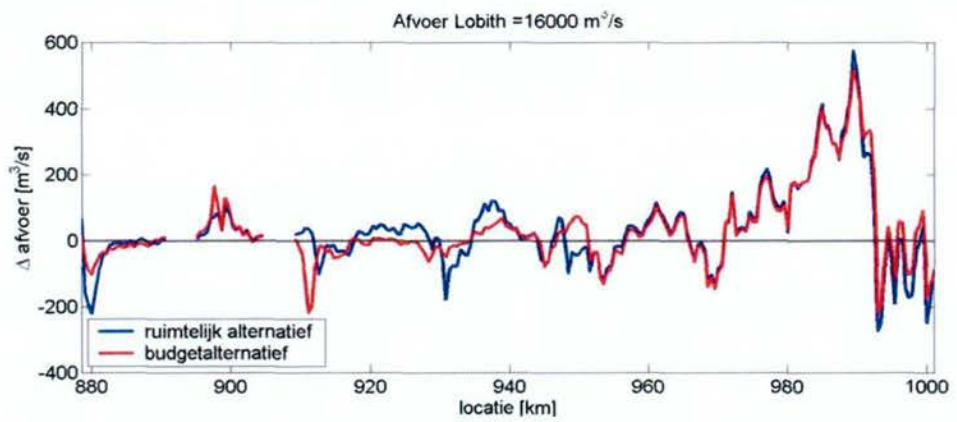
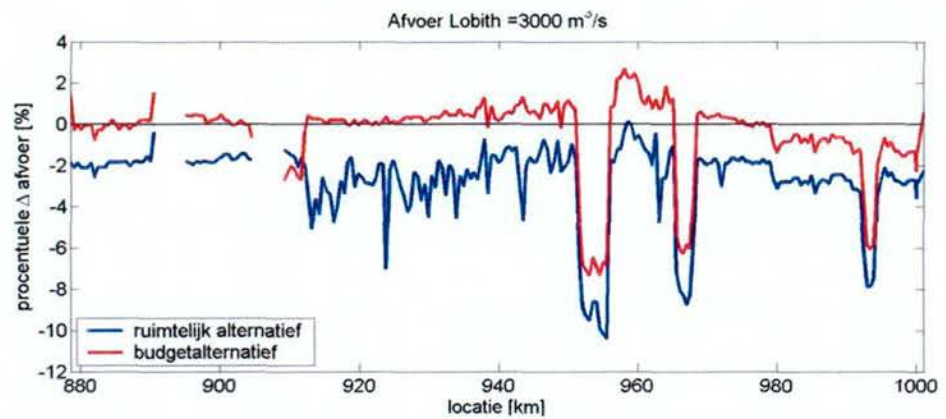
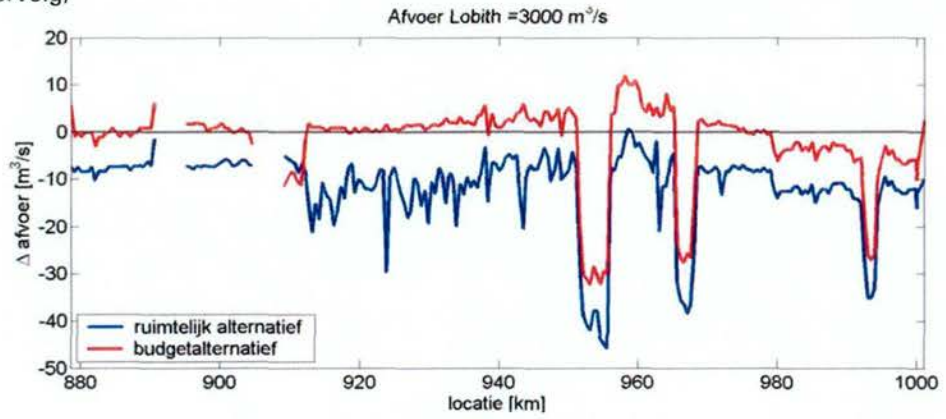




b. IJssel



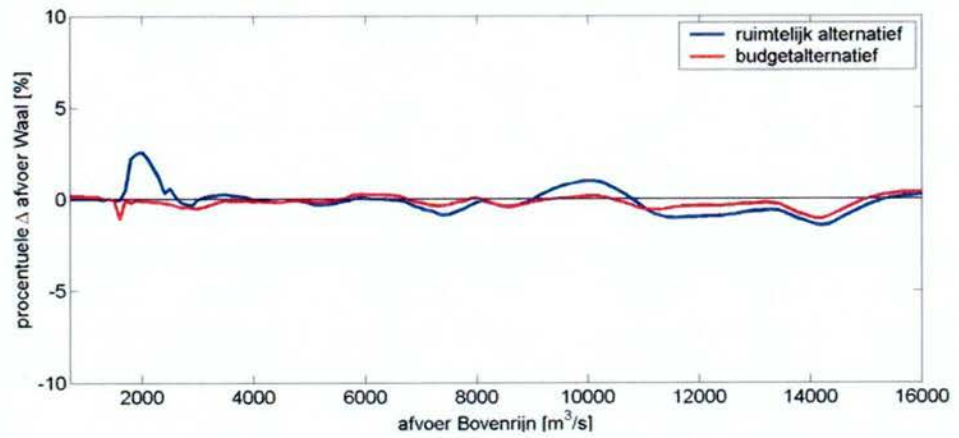
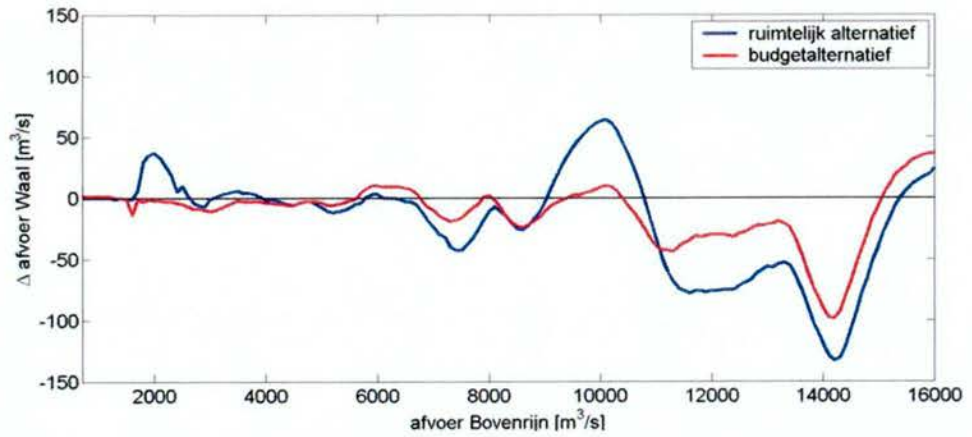
b. IJssel (vervolg)



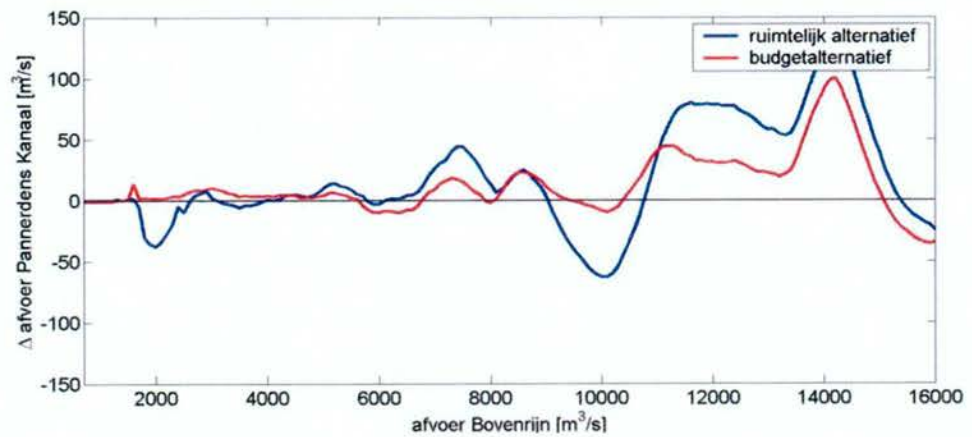


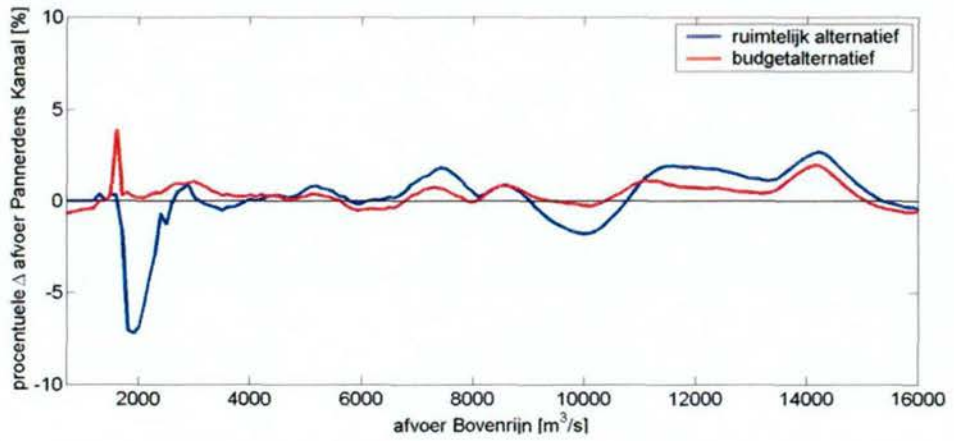
**Absolute en procentuele verandering in afvoer aan het begin van de (a) Waal, (b) Pannerdens Kanaal, (c) IJssel en (d) Nederrijn t.o.v. uitgangssituatie door het ruimtelijke en budgetalternatief bij een afvoerrange van 600-16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith**

a. Waal

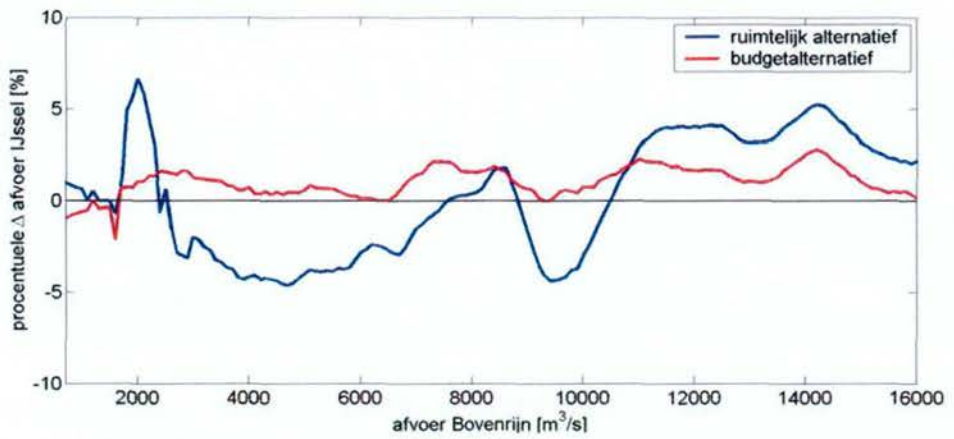
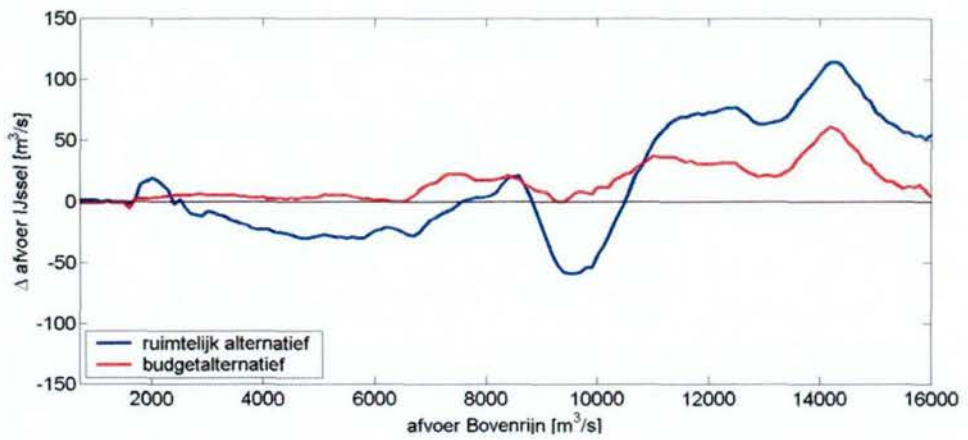


b. Pannerdens Kanaal



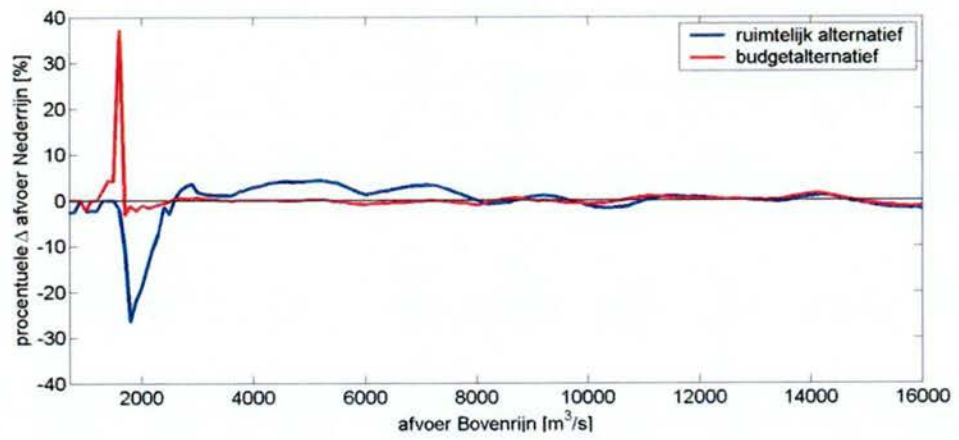
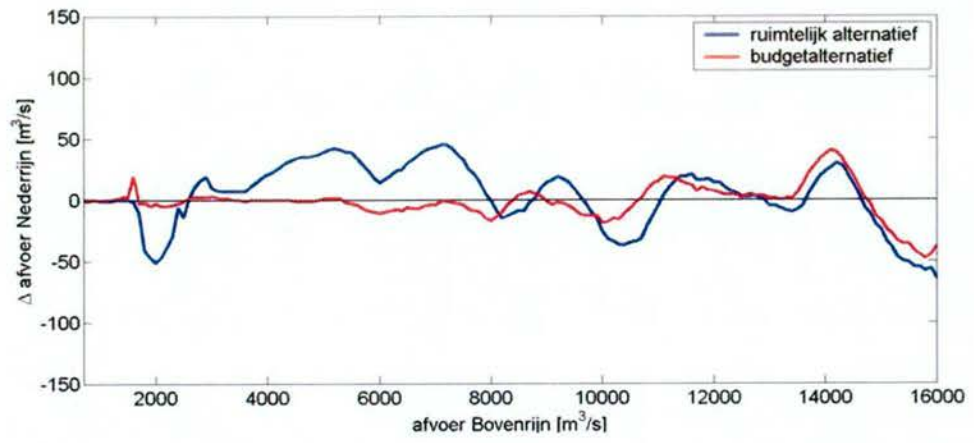


c. IJssel





d. Nederrijn



## **Bijlage 3: Memo aanpassingen SOBEK Rijntakkenmodel ten behoefte van rekestijdreductie**



Datum 10/06/2004  
Verzonden door Saskia van Vuren  
Telefoon/fax +31 (0)15 27 84375/ +31 (0)15 27 85124  
E-mail b.g.vanvuren@citg.tudelft.nl  
Onderwerp Morfologische veranderingen in de Rijntakken en het effect op verandering afvoerverdeling op splitsingspunten

Faculteit Civiele Techniek en  
Geowetenschappen  
Sectie Waterbouwkunde

Bezoek  
Stevinweg 1  
2628 CN Delft  
Correspondentie  
Postbus 5048  
2600 GA Delft

[www.waterbouw.tudelft.nl](http://www.waterbouw.tudelft.nl)

## **MEMO**

Aan Hendrik Havinga - Directie Oost Nederland  
Arjan Sieben - RIZA  
David Kroekenstoel - RIZA  
Hermjan Barneveld - HKV

---

### **Inleiding**

In het project Ruimte voor de Rivier (RvdR) zoekt de overheid naar maatregelen om de afvoercapaciteit van rivieren te vergroten en dijkverhoging zoveel mogelijk te vermijden. Onder deze maatregelen vallen onder andere de verlaging van uiterwaarden en kribben, het verwijderen van hydraulische obstakels en het aanleggen van nevengeulen.

Deze rivierverruimende maatregelen hebben een plaatselijk waterstandverlagend effect. Dit effect werkt als gevolg van de toegenomen afvoercapaciteit enkele kilometers in bovenstroomse richting door. Naast dit hydraulische effect leiden de maatregelen ook tot een morfologische reactie van de rivier in de vorm van sedimentatie en erosie in het zomerbed. Deze reactie is te voorspellen met morfologische modellen. De rivierverruimende maatregelen kunnen leiden tot een versterkte bodemvariatie in de Nederlandse Rijntakken (zie (Van Vuren & Van Breen, 2003) en (Van Breen et al, 2003)). Deze morfologische reacties kunnen tot grote hinder leiden voor de scheepvaart en tot een toename van het onderhoudsbaggerwerk in de rivier. Bovendien kunnen zij weer een negatief effect hebben op de gewenste effecten van de rivierverruiming.

In de samenwerking tussen HKV [LIJN IN WATER](#) en de TU Delft wordt een studie uitgevoerd naar het effect van twee inrichtingsstrategieën met rivierverruimende maatregelen op de bevaarbaarheid van de rivier en het onderhoudsbaggerwerk in de Rijntakken. In deze studie ligt de nadruk op het kwantificeren van onzekerheden in dit effect als gevolg van onzekerheden in het tijdsafhankelijk afvoerverloop.

### **1-D Sobek Rijntakkenmodel en Monte Carlo simulatie**

Een 1-D Sobek model (WL, 2001), het Sobek Rijntakkenmodel<sup>1</sup> (Jesse & Kroekenstoel, 2001), wordt gebruikt om de hydraulische en morfologische ontwikkelingen voor de uitgangssituatie en de inrichtingstrategieën te analyseren. De voorspellingen van deze ontwikkelingen worden vervolgens vertaald naar de bevaarbaarheid van en vereiste baggervolumes in de rivier als functie van ruimte en tijd. Om het effect van onzekerheid in het afvoerverloop op de bevaarbaarheid van de rivier en het benodigde onderhoudsbaggerwerk te onderzoeken, worden Monte Carlo simulaties (MCS) met het Rijntakkenmodel uitgevoerd. MCS (Hammersly & Handscomb, 1964) bestaat uit een groot aantal runs met het Rijntakkenmodel elk met statistisch equivalente invoer. Voor elke simulatie wordt een nieuwe invoerreeks voor de hydraulische randvoorwaarde aan de bovenrand (afvoerhydrograaf) gegenereerd op basis van een vooraf gespecificeerd statistische model. Dit leidt tot een groot aantal modeluitkomsten (morfologische en hydraulische resultaten als functie van plaats en tijd) die elk een even grote kans van voorkomen hebben. Een statistische analyse van alle modeluitkomsten geeft inzicht in de onzekerheden van rivierkundige voorspellingen.

---

<sup>1</sup> Versie gebaseerd op versie 2000.3 met aanpassingen welke staan beschreven in de Memo 'Morfologische berekeningen t.b.v. PKB Ruimte voor de rivieren' van David Kroekenstoel (2004).



### **Rekentijdreductie en modelaanpassing**

De combinatie van het aantal modelsimulaties en de rekentijd per simulatie met het Rijntakkenmodel maakt de toepassing van MCS erg rekenintensief. Een reductie van de rekentijd per simulatie kan de totale rekentijd reduceren. Deze reductie kan worden gerealiseerd door het vergroten van de rekentijdstap in het model of het verwijderen van rekenintensieve riviertakken uit het model. De rekentijdstap in het model bedraagt 1 dag. Bij het vergroten van deze tijdstap wordt het model instabiel. Deze instabiliteit wordt veroorzaakt door de hydraulische controllers (de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein) in de Nederrijn en de Lek. Deze controllers vereisen een relatief kleine rekentijdstap om instabiliteit in het model te voorkomen. Bovendien maken deze controllers het model rekenintensief. Door het verwijderen van de Nederrijn en Lek wordt de rekentijd verkleind en kan mogelijk de rekentijdstap van het model worden vergroot. De rekentijd per simulatie wordt hierdoor gereduceerd.

De takken Lek en Nederrijn tot aan kilometerraai 879 zijn verwijderd uit het model. Dat wil zeggen dat een kort riviertraject van de Nederrijn met een lengte van 1000 meter de nieuwe benedenrand in het model is. Op deze rand moet een nieuwe randvoorwaarde worden opgelegd.

Twee randvoorwaarden zijn getest:

1. Op de nieuwe benedenrand is een nieuwe rating curve (Q-h relatie) gespecificeerd met behulp van een hydraulische berekening met het volledige Rijntakkenmodel. Op de nieuwe benedenrand is een afvoerhydrograaf gedefinieerd als functie van de afvoerhydrograaf die op de bovenrand van het model bij Ruhrort is opgelegd. Uitgangspunt is dat de afvoerverdeling op de splitsingspunten tijdens de gehele simulatieperiode gehandhaafd blijft. Om de relatie tussen de afvoer op de bovenrand Ruhrort en de afvoer op de Nederrijn en Lek af te leiden, is een hydraulische simulatie met het volledige Rijntakkenmodel uitgevoerd, waarbij de bodem vast is gehouden. De afvoerrelatie ziet er als volgt uit:

$$\begin{aligned}
 Q_{BR} < 1600 & \quad Q_{NR} = 29 + 0.013 \cdot Q_{BR} \\
 1600 \leq Q_{BR} \leq 2400 & \quad Q_{NR} = -1505 + 1.29 \cdot Q_{BR} - 0.0002 \cdot Q_{BR}^2 \\
 Q_{BR} > 2400 & \quad Q_{NR} = -126 + 0.216 \cdot Q_{BR}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Deze afvoerrelatie zal vervolgens in de Monte Carlo simulaties worden gebruikt om voor elke random gegenereerde afvoerreeks op de bovenrand bij Ruhrort de bijbehorende afvoertijdreeks op de benedenrand ter plaatse van de Nederrijn te bepalen.

Voor beide nieuwe randvoorwaarden zijn simulaties uitgevoerd met een rekentijdstap van 1 dag en een vergrote rekentijdstap van 5 dagen. Om de afvoertijdreeksen in het model af te stemmen op de vergrote rekentijdstap van 5 dagen worden de afvoeren per 5 daagse periode gespecificeerd. Daartoe is elk jaar opgesplitst in 72 perioden T van ongeveer 5 dagen. Op basis van de daggemiddelde afvoeren  $Q_d$  is voor elke periode T de gewogen gemiddelde afvoer  $Q_w$  bepaald, zodanig dat het totale sedimenttransport  $S_{tot}$  in elk van deze periode ongewijzigd blijft:

$$T \cdot S(Q_w) = S_{tot}(T) \left( = T \cdot E(S) = T \cdot \int_0^{\infty} S(Q_d) p(S) dS \right) \tag{2}$$



Om de effecten van de modelaanpassingen op de morfologische (dwarsdoorsnede gemiddelde bodemligging) en hydraulische (waterstanden en afvoerverdeling op splitsingspunten) resultaten na een periode van 15 jaar te analyseren is een aantal testberekeningen uitgevoerd, te weten:

- **Simulatie 1:** het PKB referentie Rijntakkenmodel met een historische afvoerreeks van 15 jaar (1959-1973).
- **Simulatie 2:** het verkorte Rijntakkenmodel (zonder Nederrijn en Lek) met een rekentijdstap van 1 dag en op de benedenrand ter plaatse van het begin van de Nederrijn een Qh-relatie volgend uit hydraulische simulatie met het volledige Rijntakkenmodel.
- **Simulatie 3:** gelijk aan simulatie 2, maar met een vergrote rekentijdstap van 5 dagen.
- **Simulatie 4:** het verkorte Rijntakkenmodel (zonder Nederrijn en Lek) met een rekentijdstap van 1 dag en op de benedenrand ter plaatse van het begin van de Nederrijn een afvoertijdreeks volgend uit een hydraulische simulatie met het volledige Rijntakkenmodel.
- **Simulatie 5:** gelijk aan simulatie 4, maar met een vergrote rekentijdstap van 5 dagen.
- **Simulatie 6:** gelijk aan simulatie 4, maar op de benedenrand op de Nederrijn is een afvoertijdreeks volgend uit de afvoerrelatie (1) opgelegd.

## Modelresultaten

### Morfologie

De volgende morfologische resultaten na een simulatieperiode van 15 jaar staan gegeven in Bijlage 3-A:

- (1) Breedtegemiddelde bodemligging [m NAP],
- (2) Verandering in breedtegemiddelde bodemligging t.o.v. beginbodemligging [m]
- (3) Verschil in breedtegemiddelde bodemligging van simulatie 2-5 t.o.v. simulatie 1.

De resultaten laten zien dat de breedtegemiddelde bodemligging na een periode van 15 jaar voor de 6 simulaties een zelfde trend volgt. Op de Bovenrijn blijft de bodem redelijk stabiel. Op het Pannerdens Kanaal wordt erosie voorspeld. De bodem erodeert op het bovenstroomse deel van de Waal tot kmr 930. Vanaf kmr 945 tot aan de modelrand bij Werkendam voorspeld het model lichte aanzanding. Op de IJssel wordt erosie voorspeld tot aan kmr 910.

De verandering in breedtegemiddelde bodemligging t.o.v. de beginbodemligging en het verschil in breedtegemiddelde bodemligging tussen simulatie 1 en simulatie 2-6 geven beter inzicht in de onderlinge verschillen:

- *Bovenrijn:* Op de Bovenrijn blijven de onderlinge verschillen beperkt tot minder dan 0.05 m - 0.1 m. De voorspelde verandering in breedtegemiddelde bodemligging volgend uit simulatie 2 en 4 komen overeen met de voorspellingen van het PKB referentie model. In beide simulaties wordt gerekend met een rekentijdstap van 1 dag. Indien we de rekentijdstap vergroten nemen de verschillen t.ov. het PKB referentiemodel wat toe.
- *Pannerdens kanaal:* De voorspelde erosie op het Pannerdens Kanaal is groot. In Jesse & Kroekenstoel (2001) wordt opgemerkt dat deze erosie niet geheel realistisch is en extreem overschat wordt. De grootste erosie wordt voorspeld met het PKB referentiemodel. De minste erosie wordt voorspeld als op de benedenrand een afvoertijdreeks wordt opgelegd die volgt uit de afvoerrelatie (1). De resultaten van simulatie 2 waarin een Qh-relatie wordt opgelegd met een rekentijdstap van 1 dag komen het beste overeen met het PKB referentie model. Het verschil varieert tussen 0.05 en 0.15 m.
- *Waal:* Simulatie 2-6 voorspellen in vergelijking met het PKB referentiemodel een lichte toename van de erosie op het bovenstroomse deel van de Waal. Op het benedenstroomse traject kmr 955-960 voorspellen ze een toename van aanzanding. De verschillen tussen de simulaties met op de benedenrand op de Nederrijn een Qh-relatie zijn minder groot dan de verschillen tussen simulaties met op de benedenrand op de Nederrijn een afvoertijdreeks. De resultaten van simulatie 2 komen het beste overeen met geeft het PKB referentiemodel.
- *IJssel:* Op het bovenstroomse deel van de IJssel tot aan kmr 895 wordt door simulatie 2-6 minder erosie voorspeld dan met het referentiemodel wordt voorspeld. Dit verschil is het grootste voor de simulatie met op de benedenrand een Qh-relatie. Op het traject 895 - 995 komen de bodemvoorspellingen voor alle simulaties redelijk met elkaar overeen. De onderlinge verschillen zijn daar kleiner dan 0.05 m. Op het benedenstroomse traject 995-



1006 nemen de verschillen toe tot lokaal 0.2 m. In het traject 895-1006 blijft het verschil tussen het PKB referentiemodel en simulatie 2 beperkt tot enkele centimeters.

De bovenstaande verschillen kunnen onder andere worden verklaard door het verwijderen van de hydraulische controllers uit het model, de gekozen randvoorwaarde en de rekentijdstep.

## Hydraulica

De stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein zijn gemodelleerd als hydraulische controllers die de waterstand en afvoerdeling sturen met behulp van een drempelhoogte. Als functie van de afvoer op de bovenrand van het model, is een drempelhoogte bepaald voor elk van de stuwen. Echter in werkelijkheid is de instelling van de drempelhoogte niet alleen afhankelijk van het afvoerloop op de rivier, maar ook van de riviergeometrie. Morfologische veranderingen in het model zullen de gewenste afvoerregeling door de stuwen beïnvloeden. Namelijk, indien de bodem op de Nederrijn erodeert komen de waterstanden bij dezelfde afvoer lager te liggen; de vastgestelde drempelhoogte blijft echter gelijk, waardoor er meer water richting de IJssel wordt gestuurd. Het effect van morfologische veranderingen op de afvoerdeling op de splitsingspunten is te zien in Bijlage 3-B. Na een periode van morfologische ontwikkeling van respectievelijk 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 en 100 jaar, is de afvoerdeling op de splitsingspunten voor Bovenrijnafvoeren oplopend van 600 m<sup>3</sup>/s in stapjes van 100 m<sup>3</sup>/s tot 16000 m<sup>3</sup>/s geanalyseerd. Met name binnen het stuwgebied gedurende afvoeren bij Ruhrort tot 2400 m<sup>3</sup>/s verandert de afvoerdeling. De afvoer op de Waal neemt af. Als gevolg hiervan neemt de afvoer op het Pannerdens Kanaal toe. Op de IJsselkop wordt meer afvoer richting de IJssel gestuurd.

In simulatie 2-6 zijn de stuwen uit het model verwijderd. In simulatie 4-6 wordt een afvoertijdreeks op de nieuwe benedenrand in de Nederrijn opgelegd. Op die manier is de afvoer op de Nederrijn vastgelegd. De afvoerdeling op de Pannerdense Kop kan echter wel veranderen als gevolg van morfologische veranderingen. Als gevolg hiervan kan de afvoer op de IJssel ook veranderen. Dit is te zien in Bijlage 3-B, waar voor simulatie 6 de afvoerdeling op de splitsingspunten op overeenkomstige wijze als voor het PKB referentiemodel is onderzocht. Te zien is dat als functie van de tijd, de afvoer door het Pannerdens Kanaal ten koste van de afvoer op de Waal daalt. Aangezien de afvoerdeling op de Nederrijn als functie van de afvoer op de bovenrand constant wordt gehouden, werkt een daling van de afvoer op het Pannerdens Kanaal versterkt door in een daling van de afvoer op de IJssel.

In simulatie 2-3, is een Qh-relatie op de benedenrand opgelegd. Door morfologische verandering kan de afvoerdeling op de splitsingspunten veranderen in de tijd. In Bijlage 3-B is voor simulatie 2 de afvoerdeling op de splitsingspunten op overeenkomstige wijze als voor het PKB referentiemodel onderzocht. De resultaten laten zien dat over een periode van 15 tot 20 jaar de afvoerdeling redelijk constant is. Na 20 jaar nemen de verschillen wel enorm toe.

Het verloop van de waterstanden op de IJsselkop en de Pannerdense Kop in simulatie 2 en simulatie 4 t.o.v. de voorspellingen met het referentie PKB model staan gegeven als functie van de tijd in Bijlage 3-C. De grootste verschillen zijn te zien op de IJsselkop. De verschillen in waterstandberekening volgend uit simulatie 4 met benedenstrooms een afvoertijdreeks zijn groter dan de verschillen volgend uit simulatie 2 met benedenstrooms een Qh-relatie.

## Conclusies

Uit bovenstaande analyses concluderen we dat de resultaten van de simulaties waarin een Qh-relatie wordt opgelegd beter overeen komen met het PKB referentiemodel dan de resultaten van de simulaties waarin een afvoertijdreeks wordt opgelegd op de benedenrand.

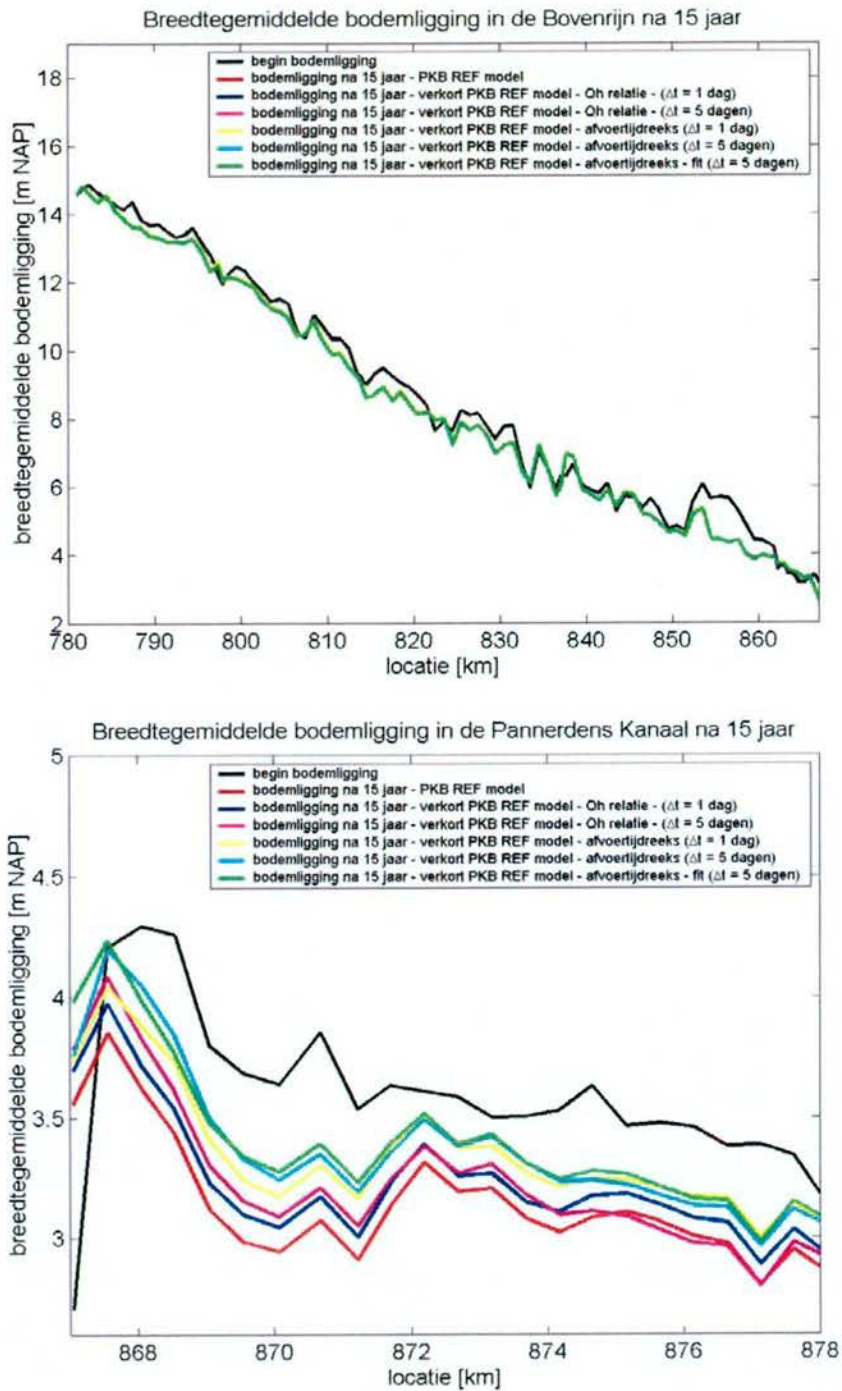
De grootste rekentijdreductie - een reductie van 50% - wordt behaald met het verwijderen van Nederrijn en Lek. Met het vergroten van de rekentijdstep van 1 dag naar 5 dagen wordt de rekentijd nog eens met 75% gereduceerd. Echter met het vergroten van de rekentijdstep nemen de verschillen t.o.v. het PKB referentiemodel toe. In de PKB studie voert RIZA een deterministische analyse uit naar de invloed van RvdR inrichtingsstrategieën op bevaarbaarheid en onderhoudsbaggerwerk. Om de resultaten van de analyses van RIZA vergelijkbaar te houden met de resultaten van deze studie, wordt de voorkeur gegeven aan een rekentijdstep van 1 dag.



### ***Aanbeveling***

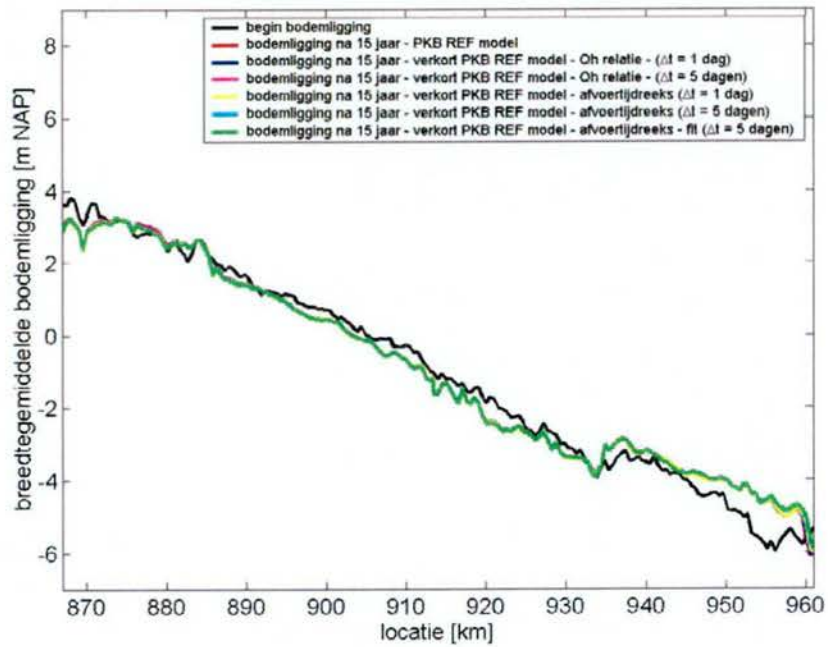
We stellen voor in het vervolg van deze studie te rekenen met het verkorte Rijntakkenmodel (zonder Nederrijn en Lek) met een rekentijdstap van 1 dag en op de benedenrand ter plaatse van het begin van de Nederrijn een Qh-relatie volgend uit hydraulische simulatie met het volledige Rijntakkenmodel.

## Bijlage 3-A - morfologische resultaten na 15 jaar

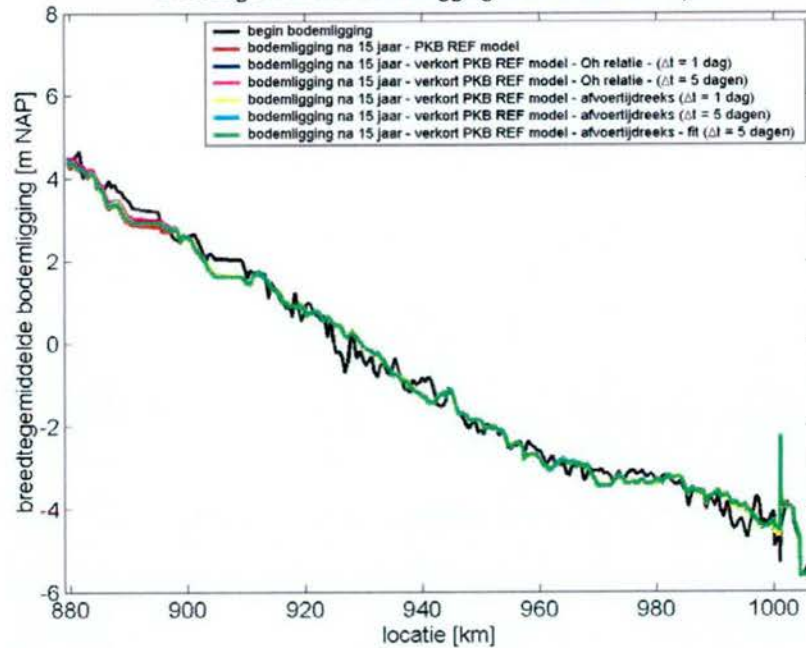


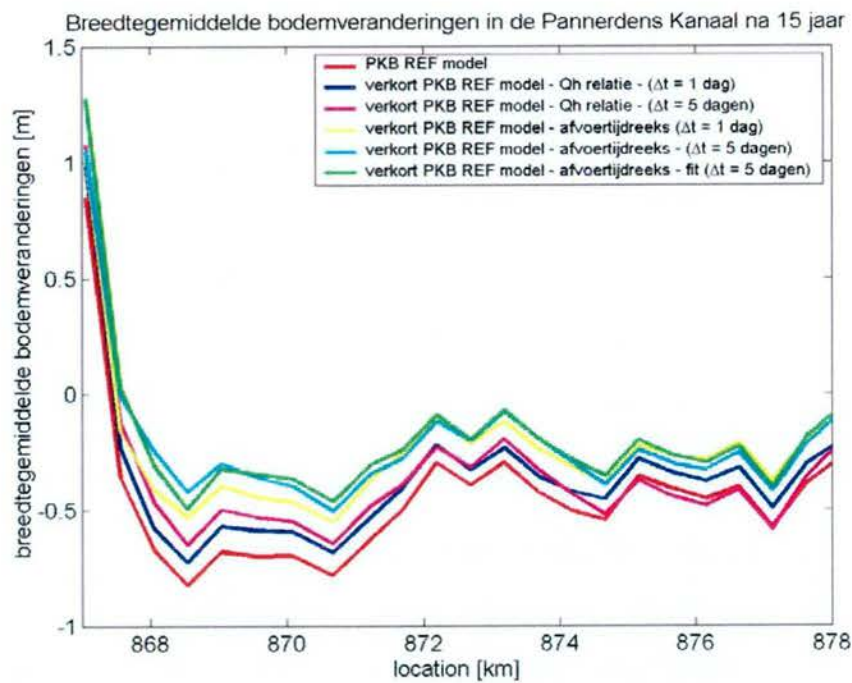
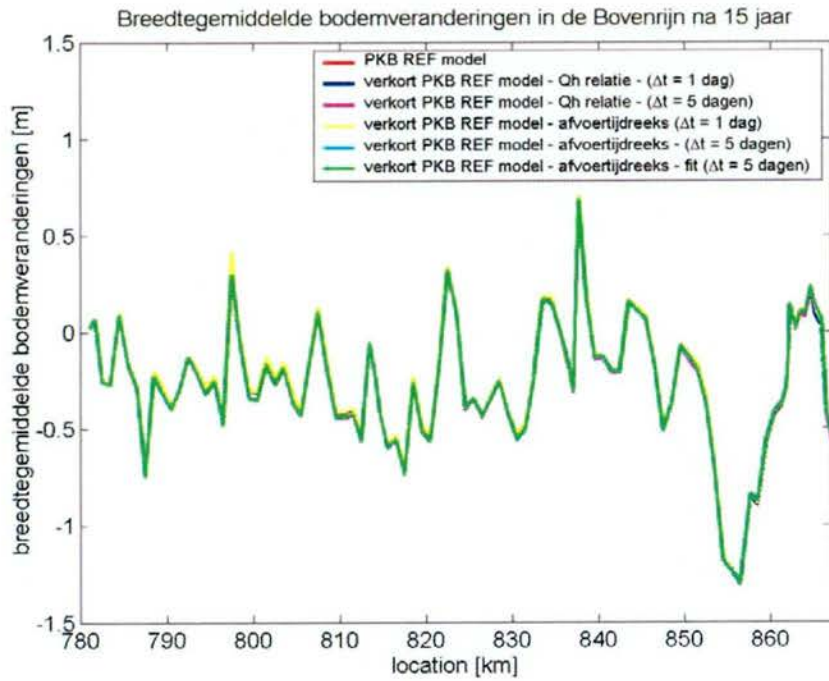


Breedtegemiddelde bodemligging in de Waal na 15 jaar

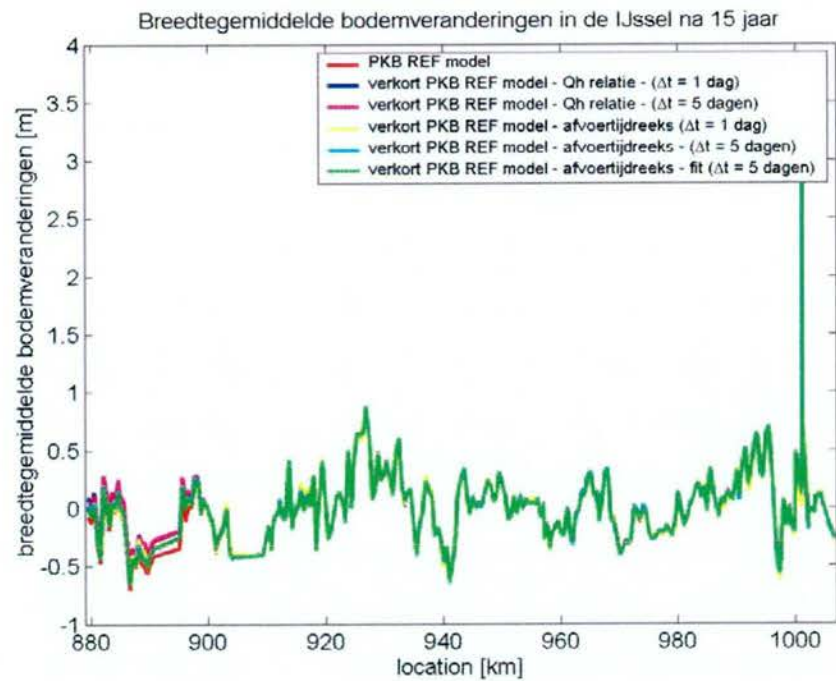
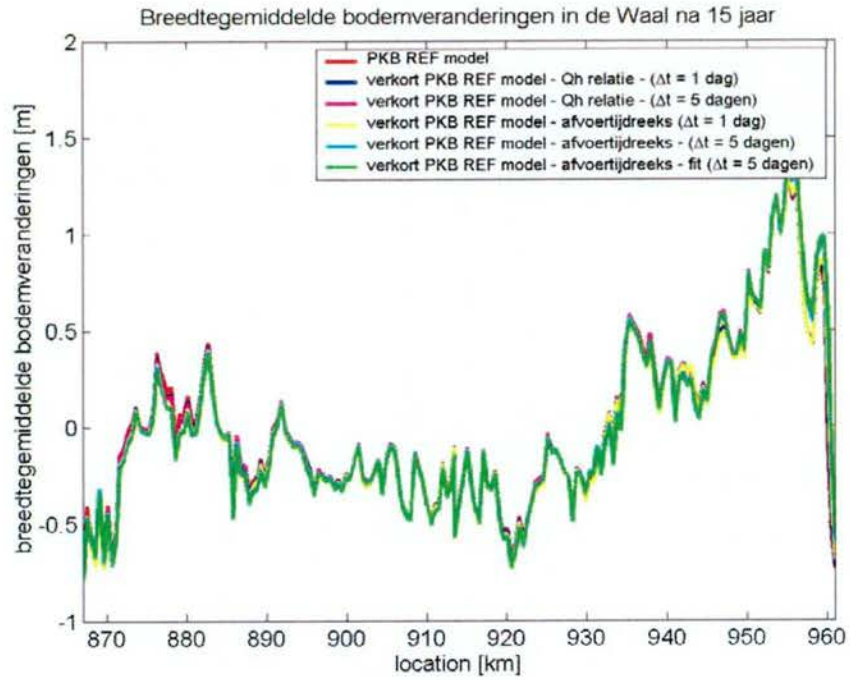


Breedtegemiddelde bodemligging in de IJssel na 15 jaar

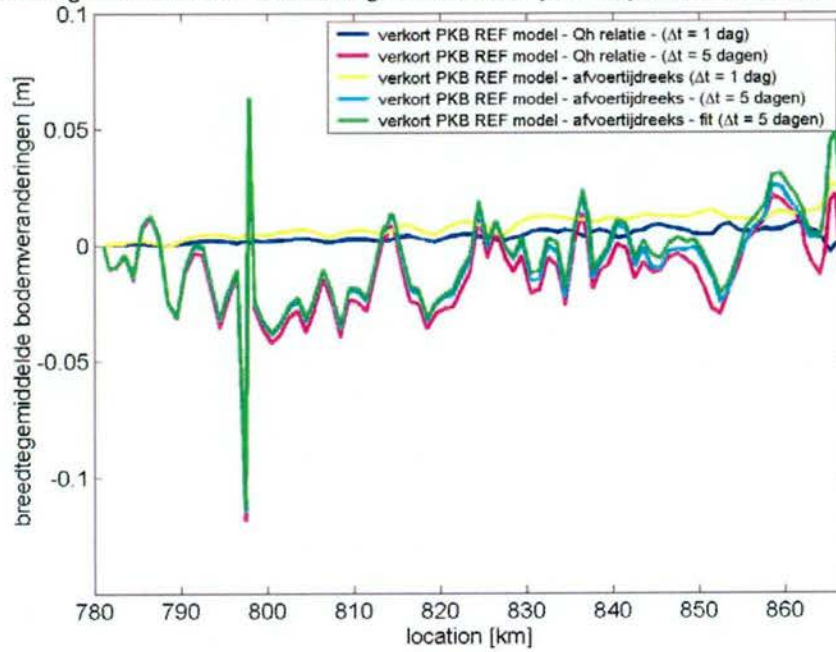




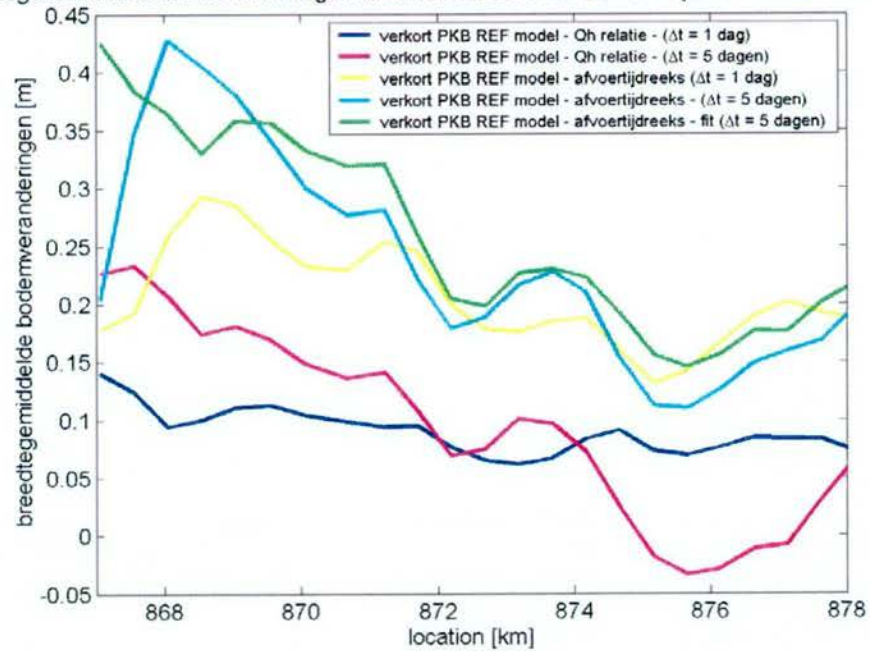




Breedtegemiddelde bodemveranderingen in de Bovenrijn na 15 jaar t.o.v. Referentie PKB model

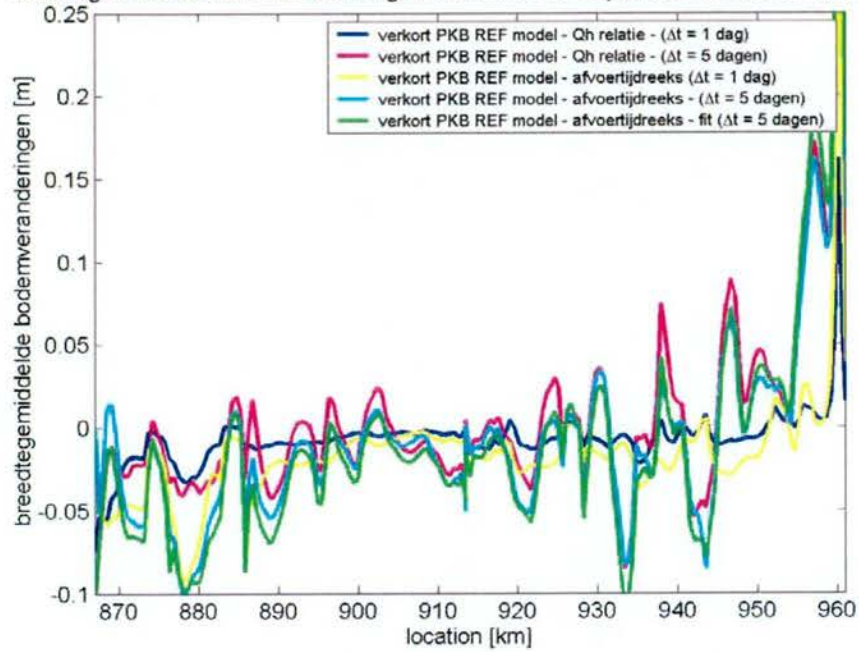


Breedtegemiddelde bodemveranderingen in de Pannerdens Kanaal na 15 jaar t.o.v. Referentie PKB model

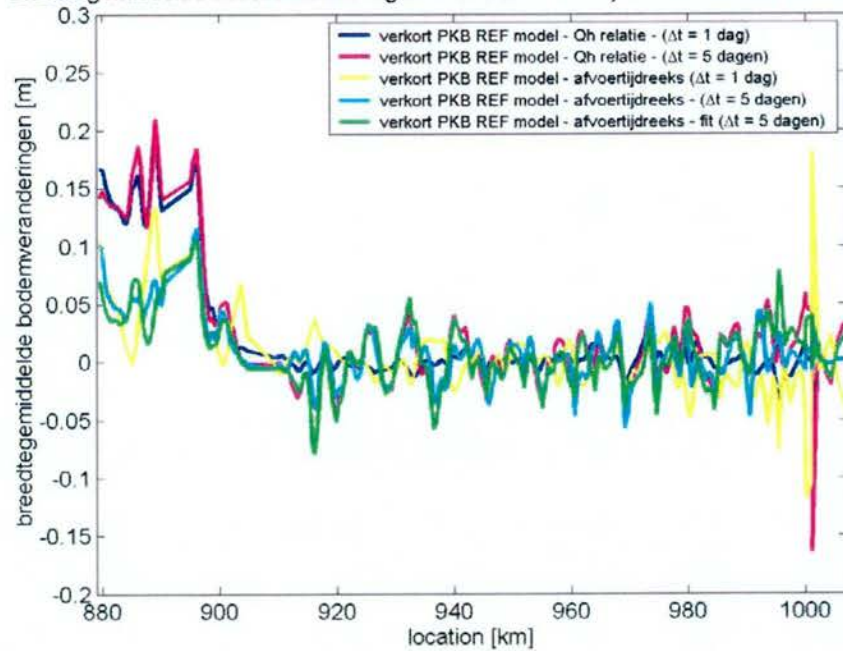




Breedtegemiddelde bodemveranderingen in de Waal na 15 jaar t.o.v. Referentie PKB model

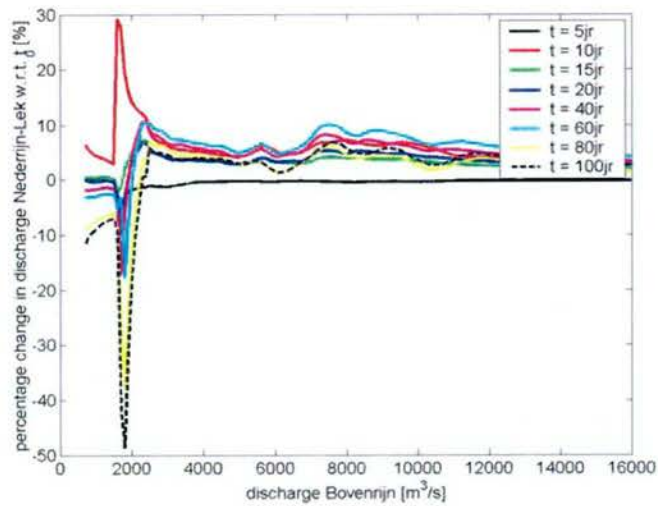
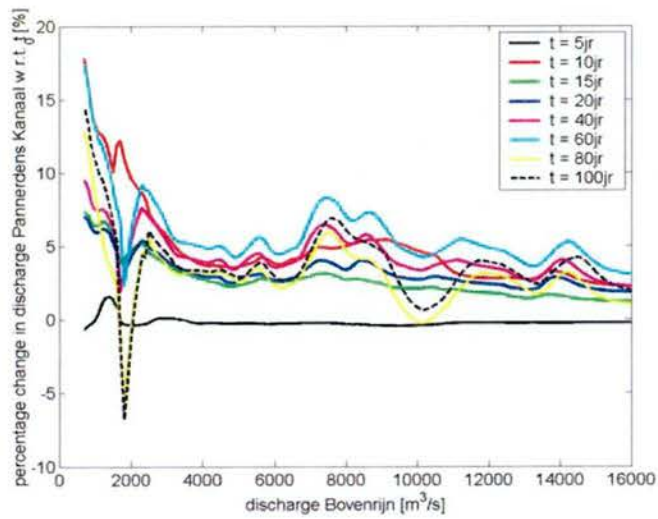


Breedtegemiddelde bodemveranderingen in de IJssel na 15 jaar t.o.v. Referentie PKB model

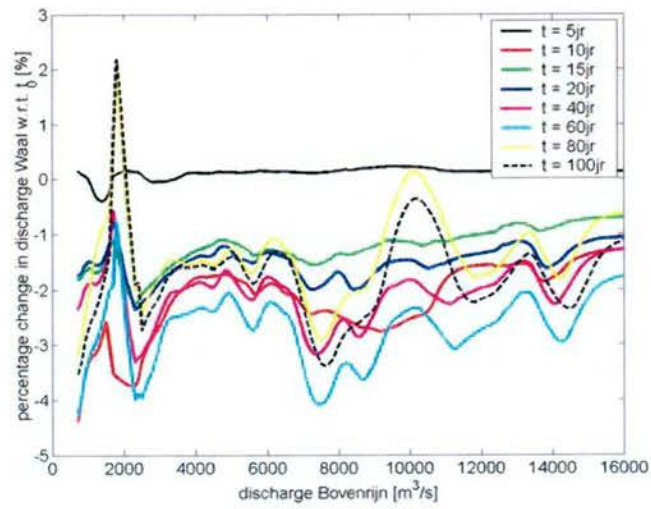
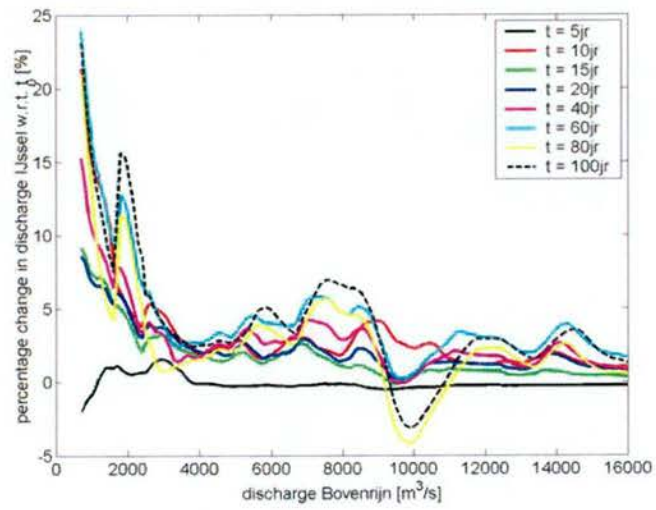


## Bijlage 3-B - hydraulische resultaten na 15 jaar

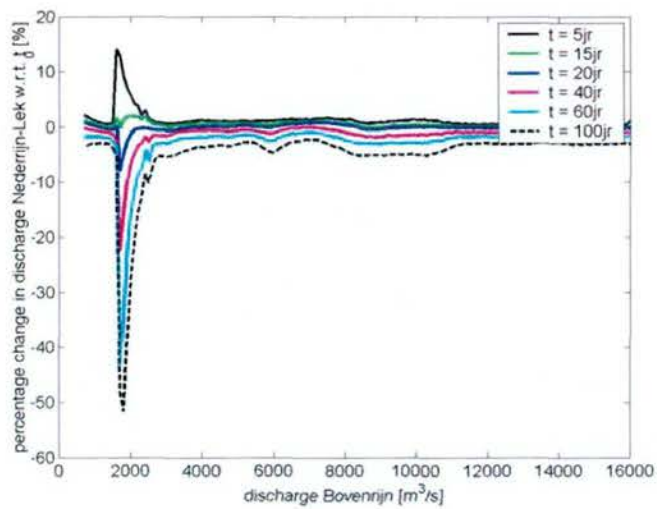
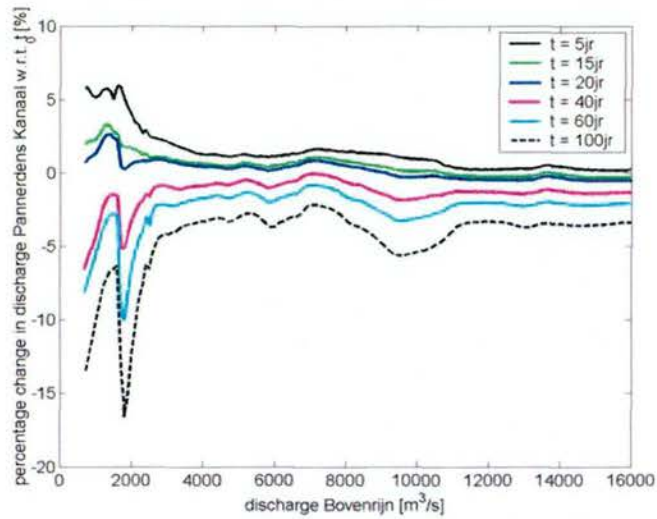
Simulatie 1: het PKB referentiemodel



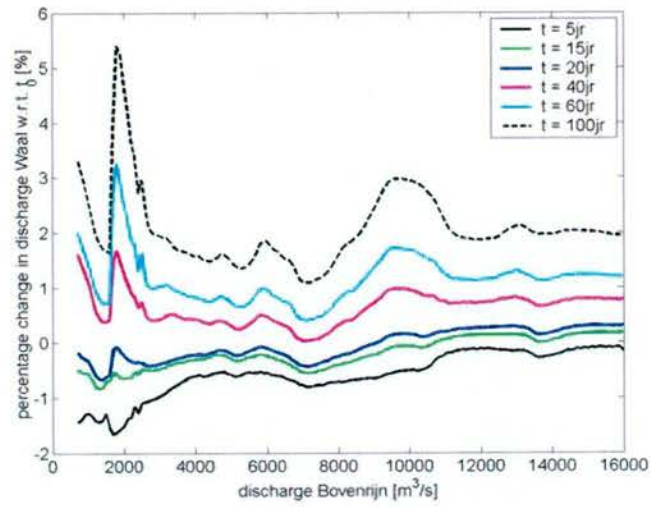
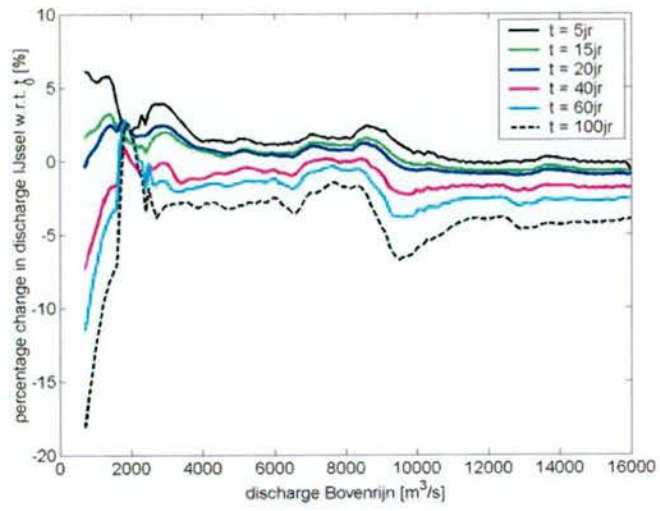




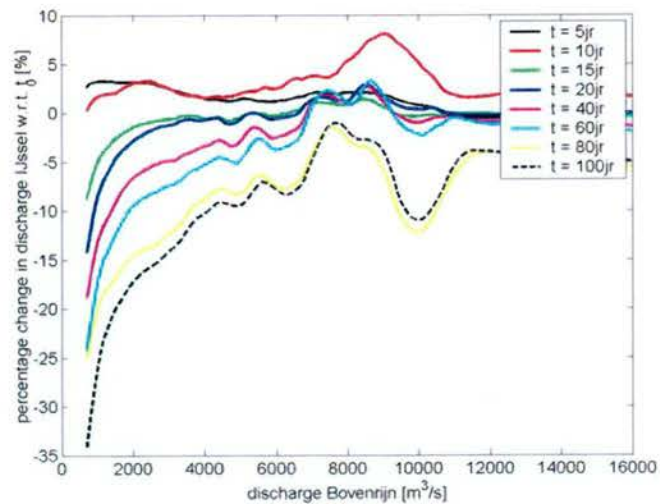
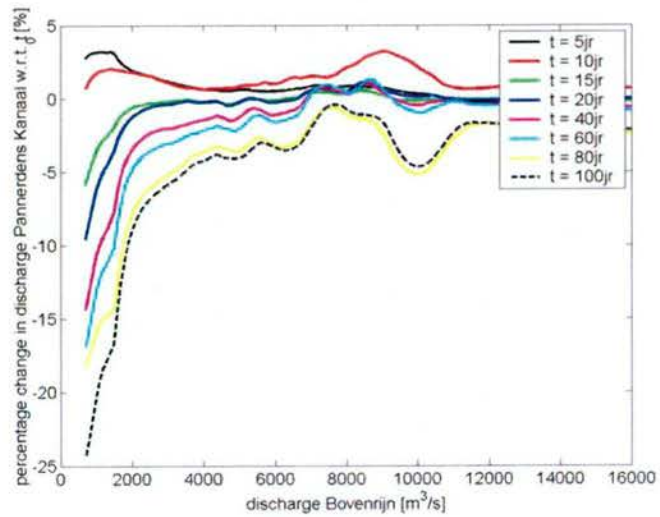
Simulatie 2: het verkorte PKB referentiemodel met een rekentijdstep van 1 dag; op de benedenrand een Qh-relatie.







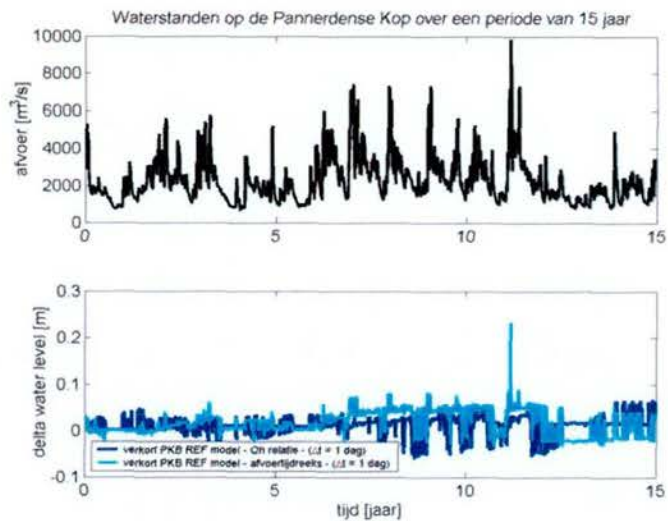
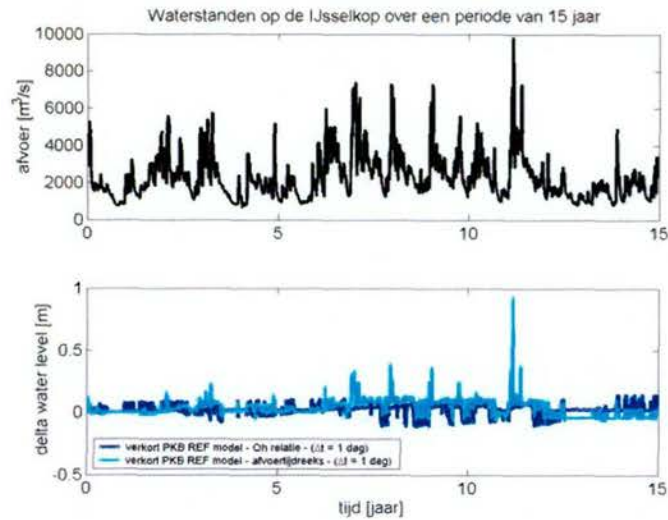
Simulatie 3: het verkorte PKB referentiemodel met een rekentijdstep van 1 dag; op de benedenrand een afvoertijdreeks volgend uit een hydraulische simulatie met het PKB referentie model.







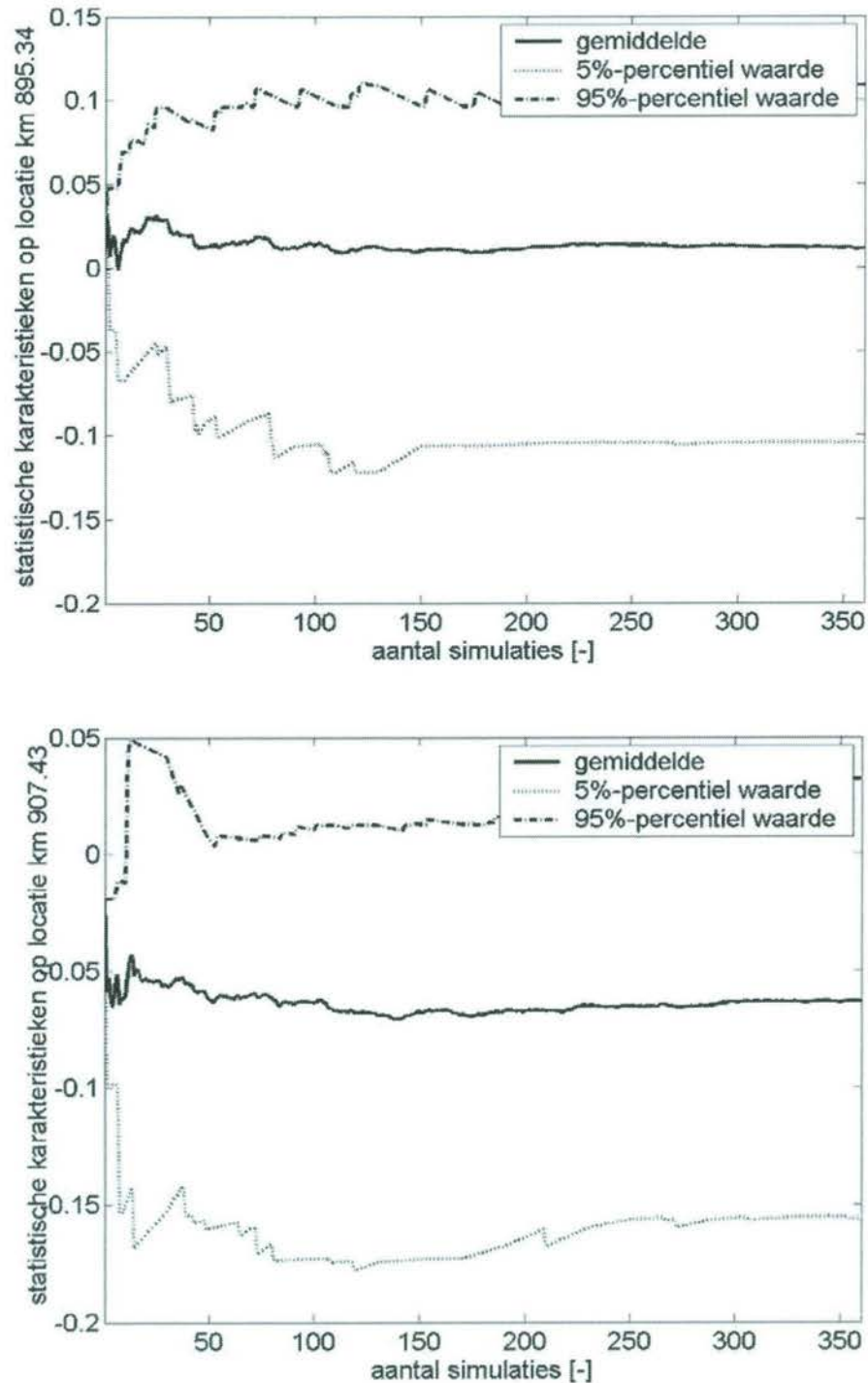
## Bijlage 3-C - hydraulische resultaten - waterstanden splitsingspunten





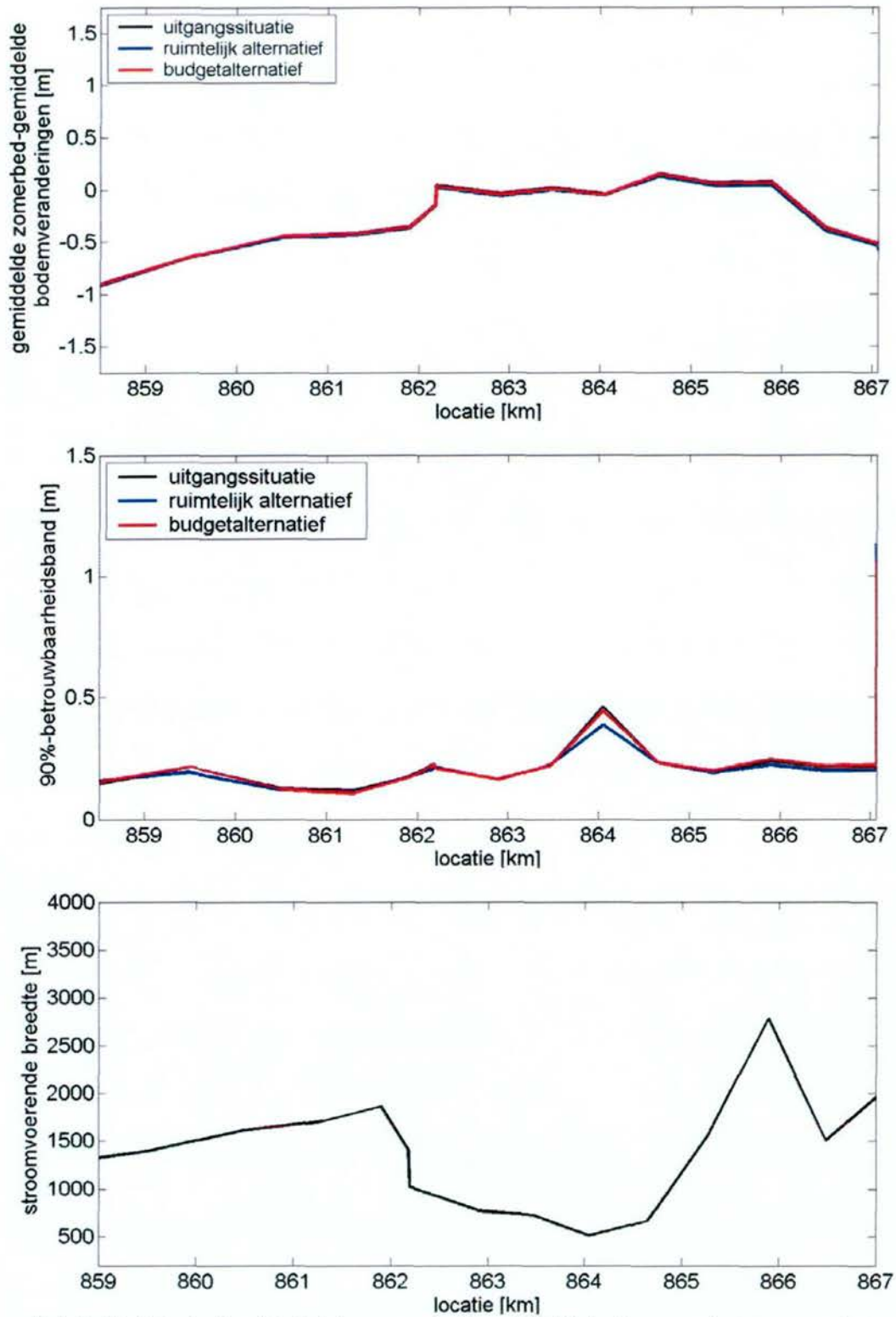
## Bijlage 4: Statistische karakteristieken morfologische veranderingen als gevolg van RvdR-basisalternatieven

### Convergentie statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen



Figuur B.4-1. Convergentie statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen op twee locaties in de Waal: (a) locatie km 895.34; (b) locatie km 907.43.

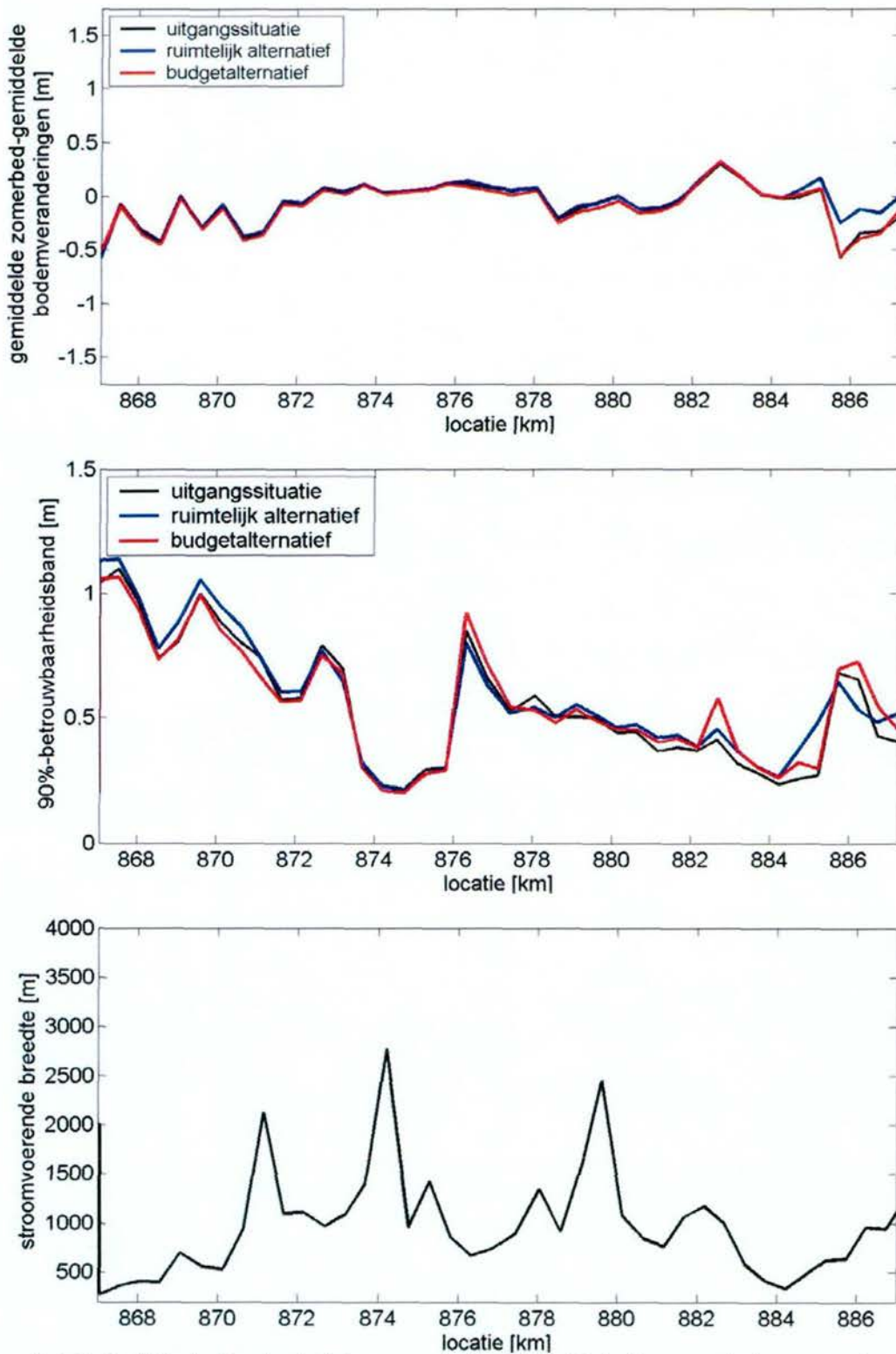
**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - Waal 1**



*Figuur B.4-2. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject Waal 1 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.*

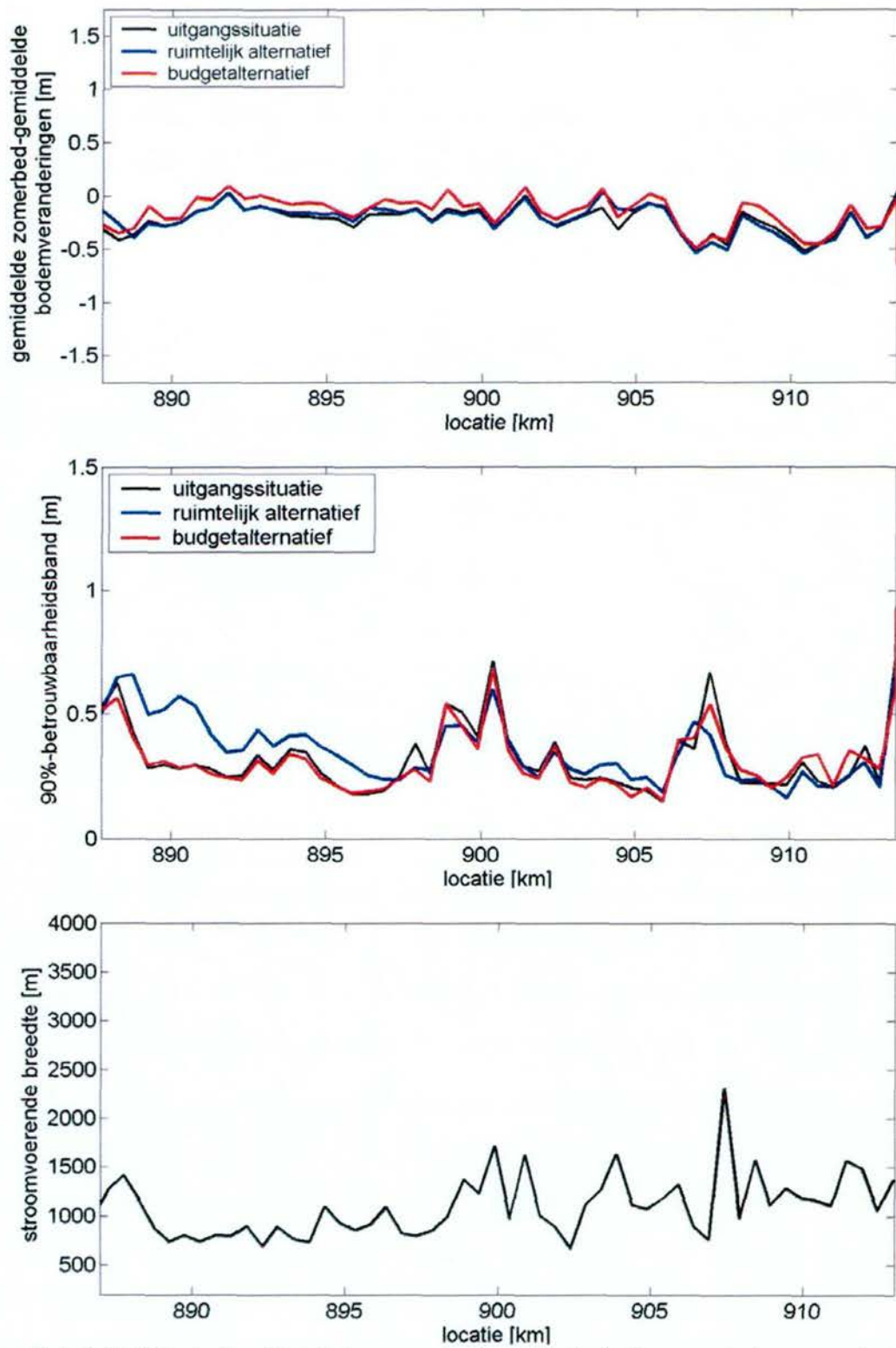


**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - Waal 2**



*Figuur B.4-3. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject Waal 2 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.*

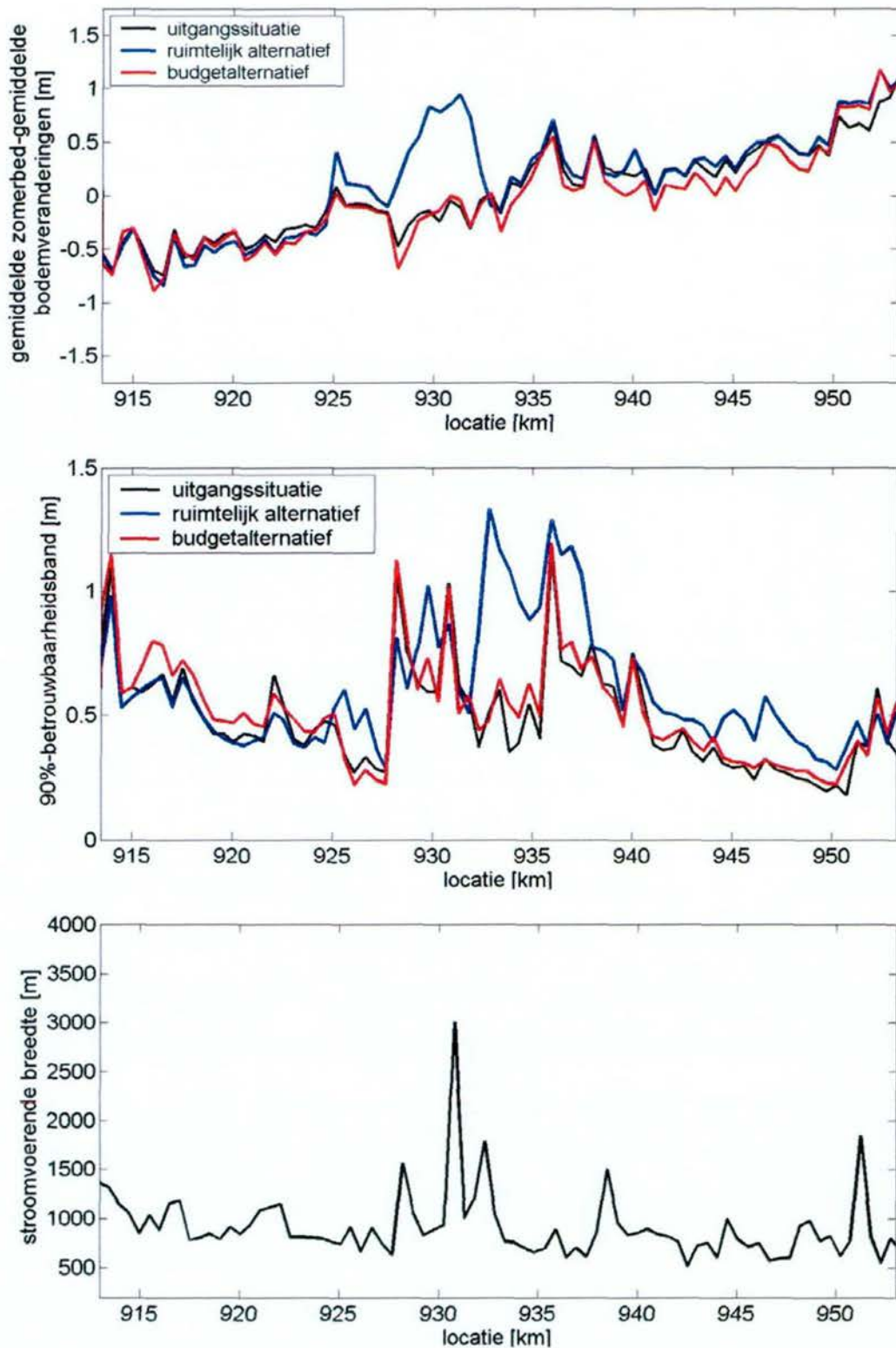
**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - Waal 3**



*Figuur B.4-4. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject Waal 3 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.*

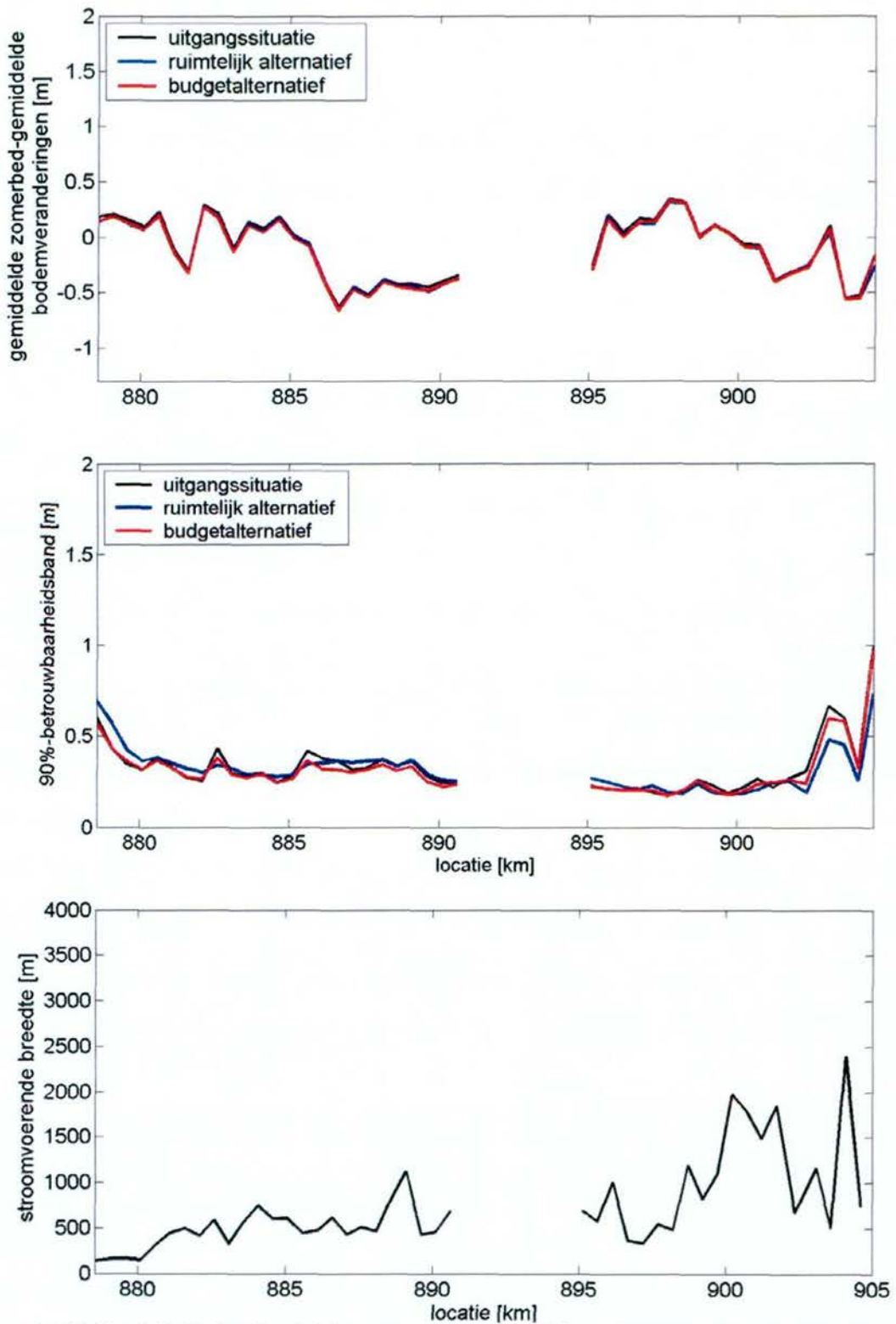


**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - Waal 4**



*Figuur B.4-5. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject Waal 4 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.*

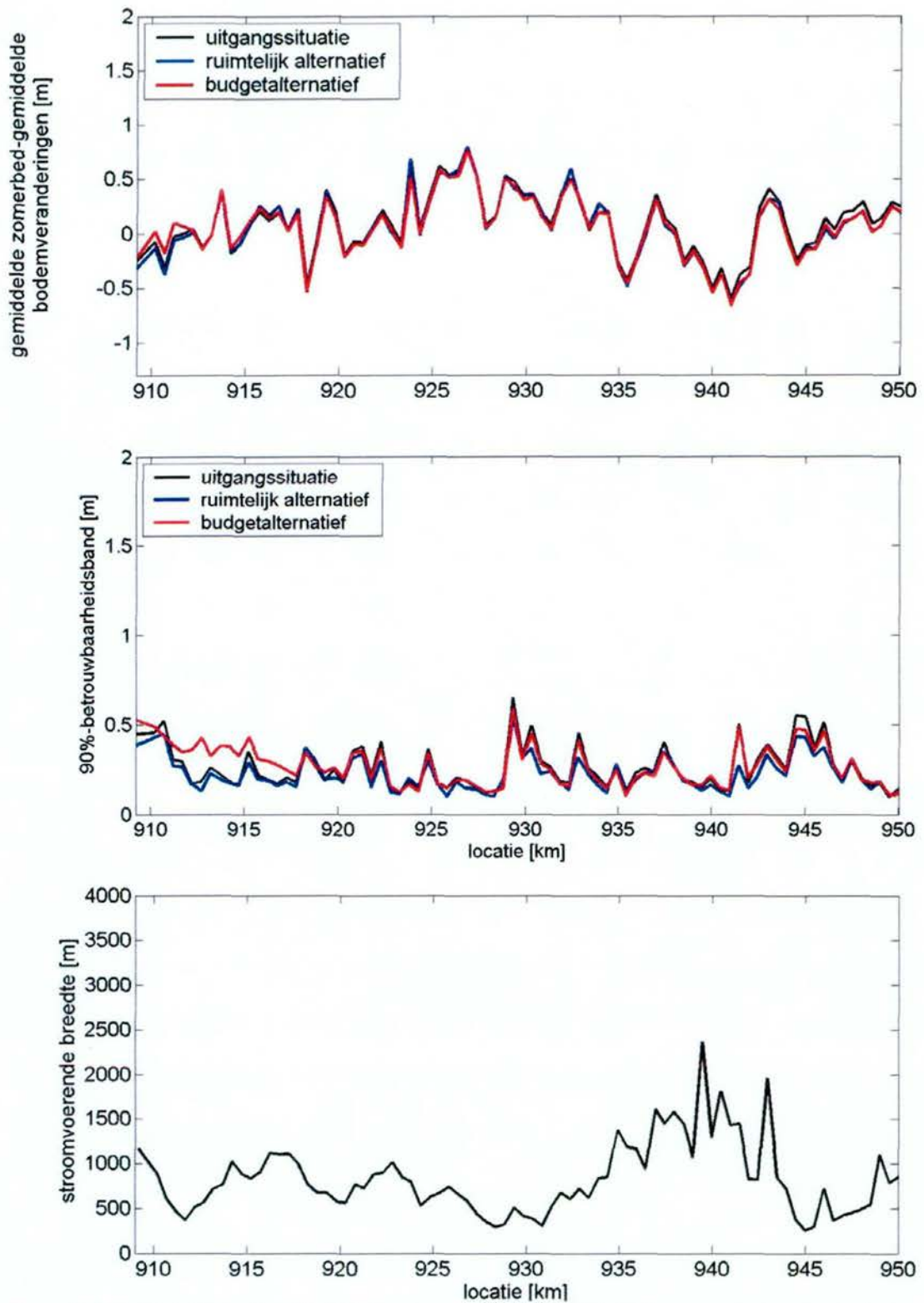
Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - IJssel 1



Figuur B.4-6. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject IJssel 1 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.

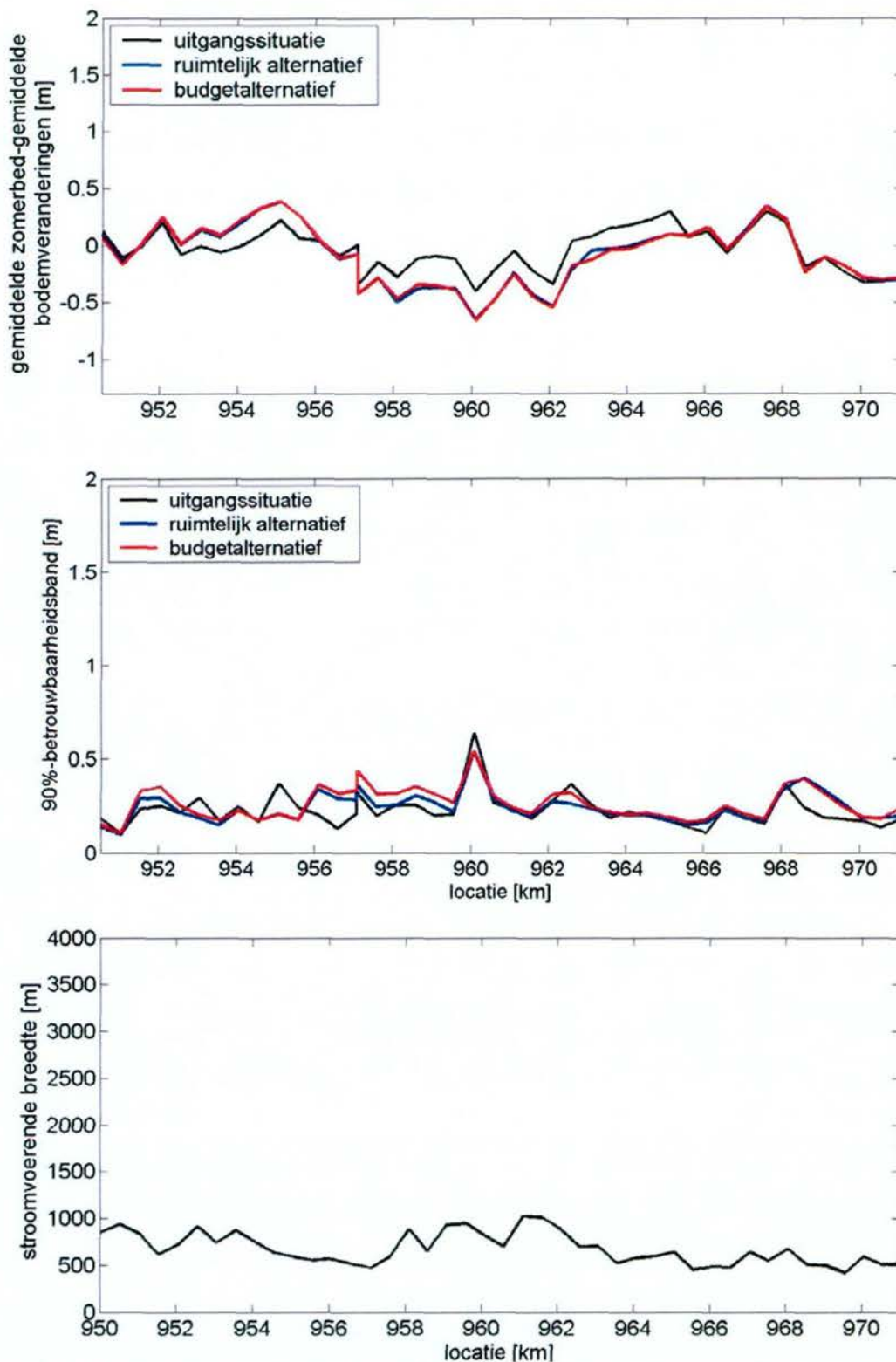


**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - IJssel 2**



Figuur B.4-7. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject IJssel 2 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.

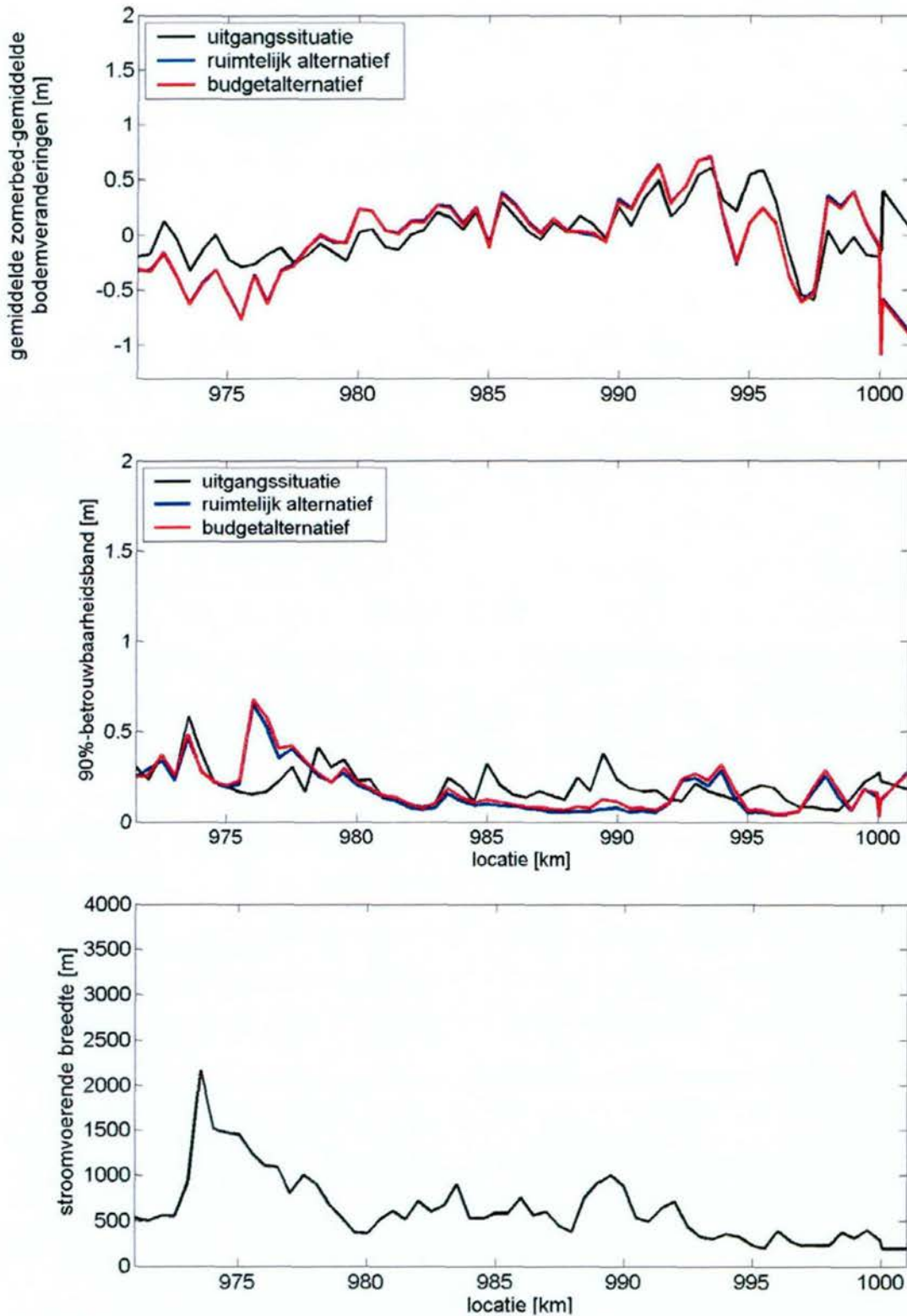
**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - IJssel 3**



Figuur B.4-8. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject IJssel 3 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.

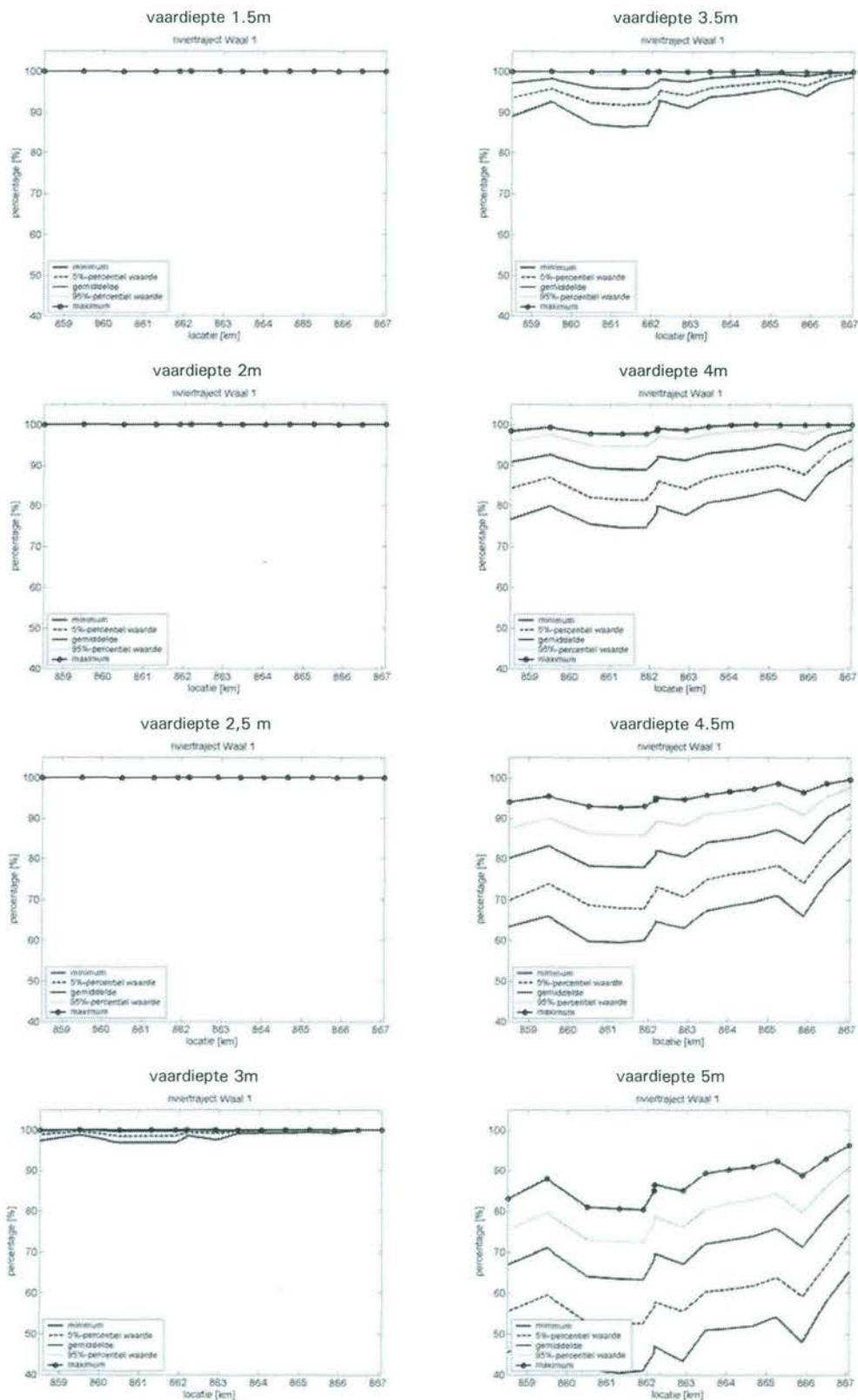


**Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen - IJssel 4**



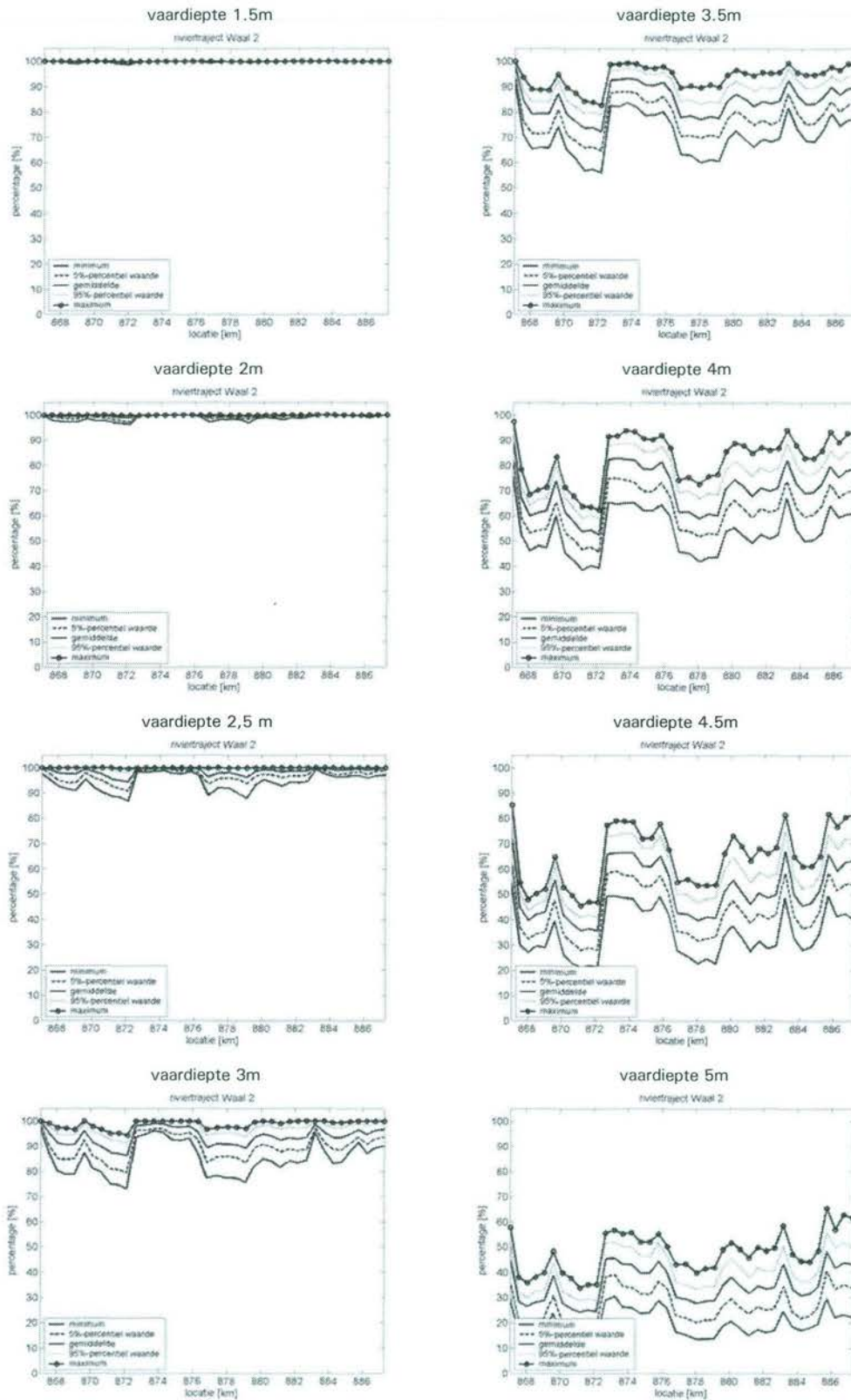
Figuur B.4-9. Statistische karakteristieken zomerbed-gemiddelde bodemveranderingen voor het riviertraject IJssel 4 voor de uitgangssituatie en de RvdR-basisalternatieven : (a) verwachtingswaarden; (b) 90%-betrouwbaarheidsband; (c) stroomvoerende breedte.

## Bijlage 5: Bevaarbaarheid per rivierlocatie

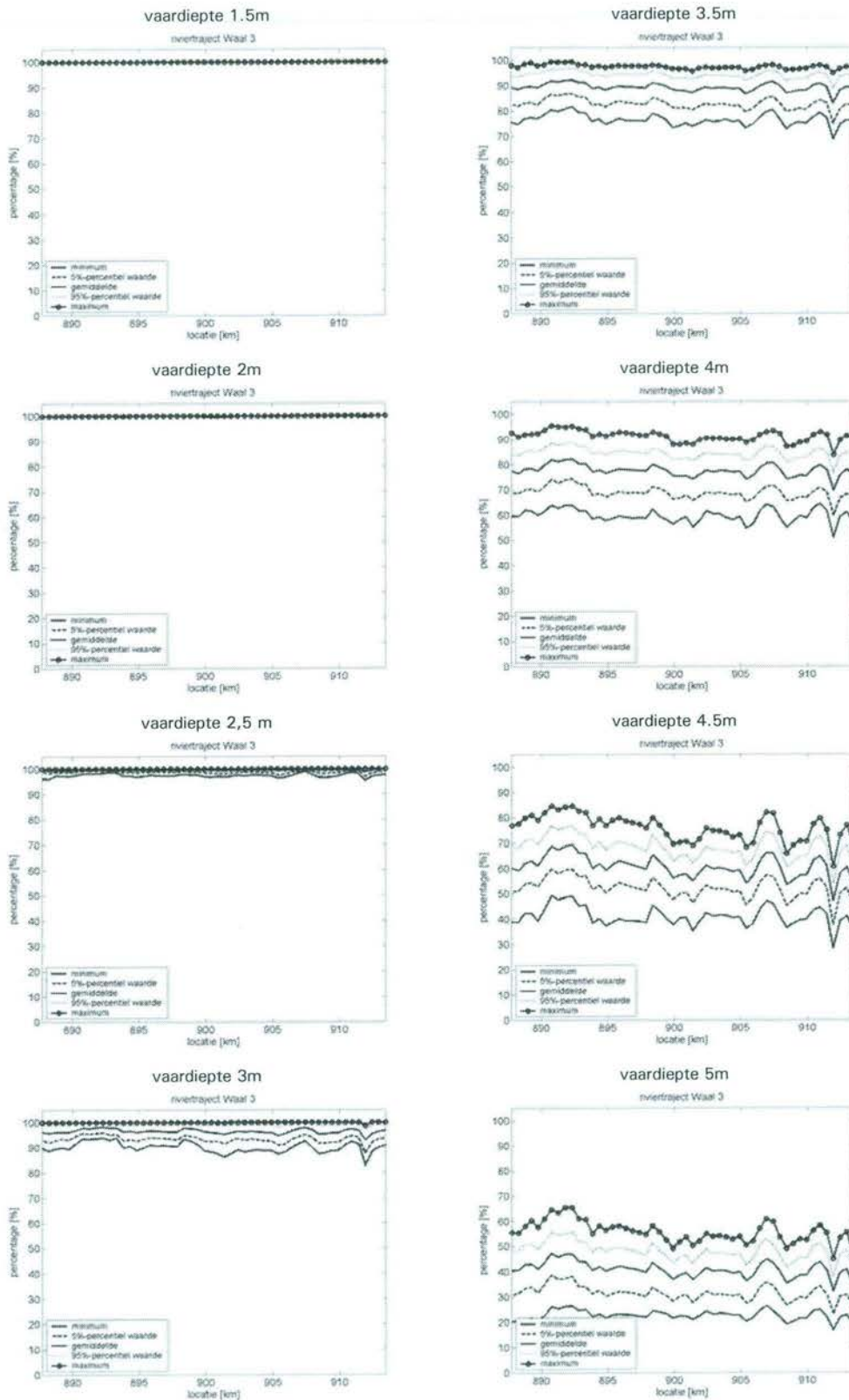


Figuur B.5-1. statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject Waal 1.



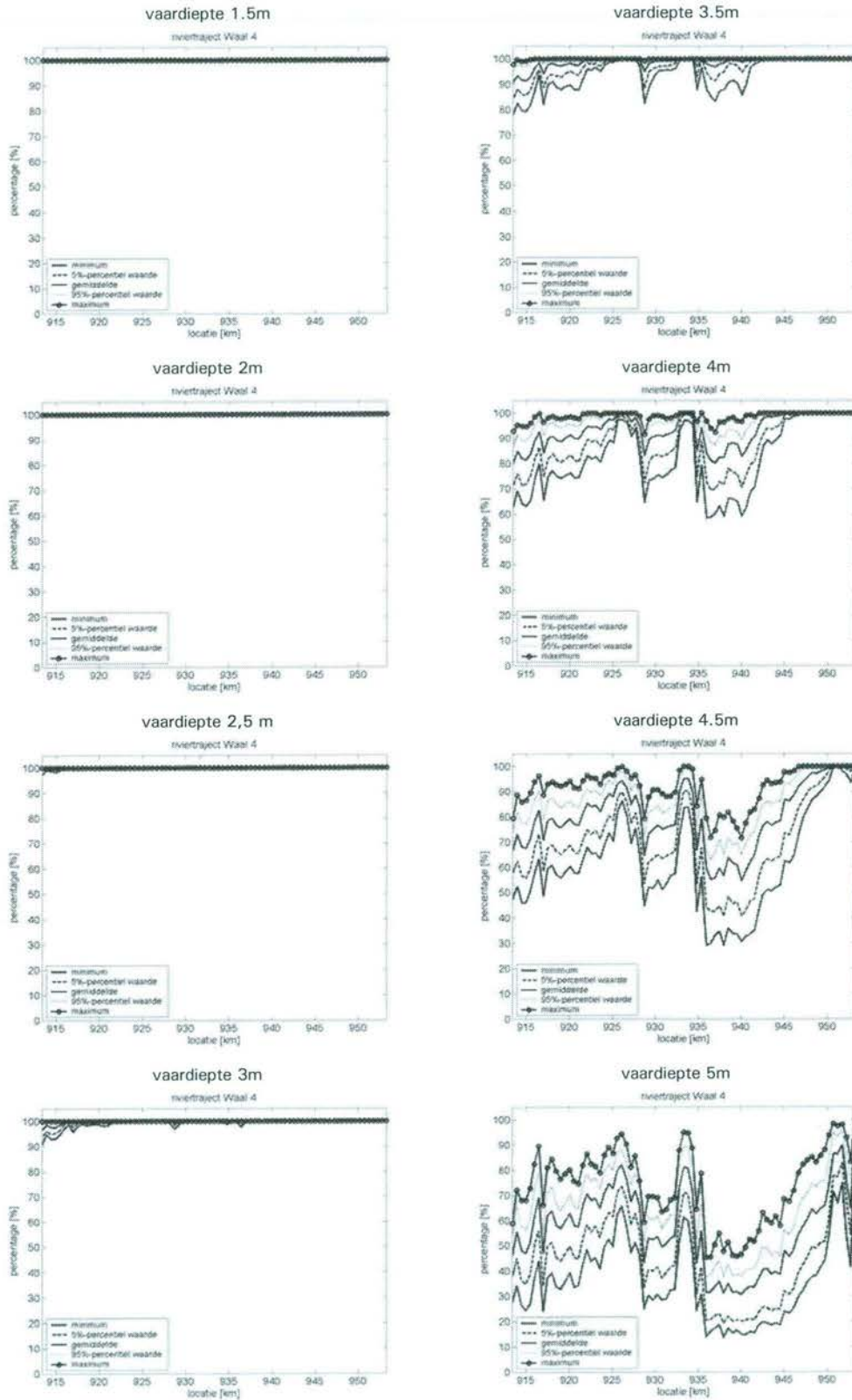


Figuur B.5-2. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject Waal 2.

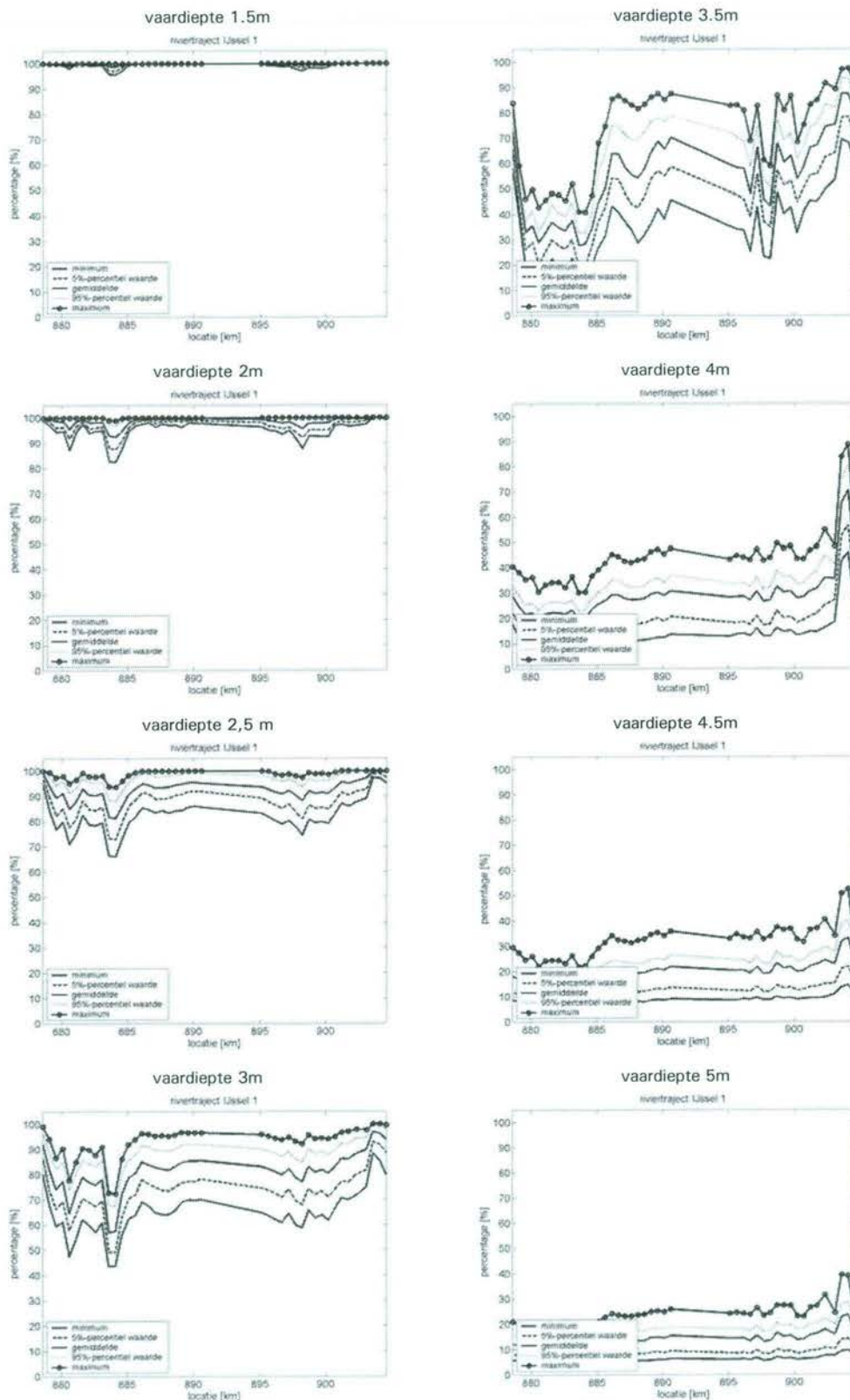


Figuur B.5-3. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject Waal 3.



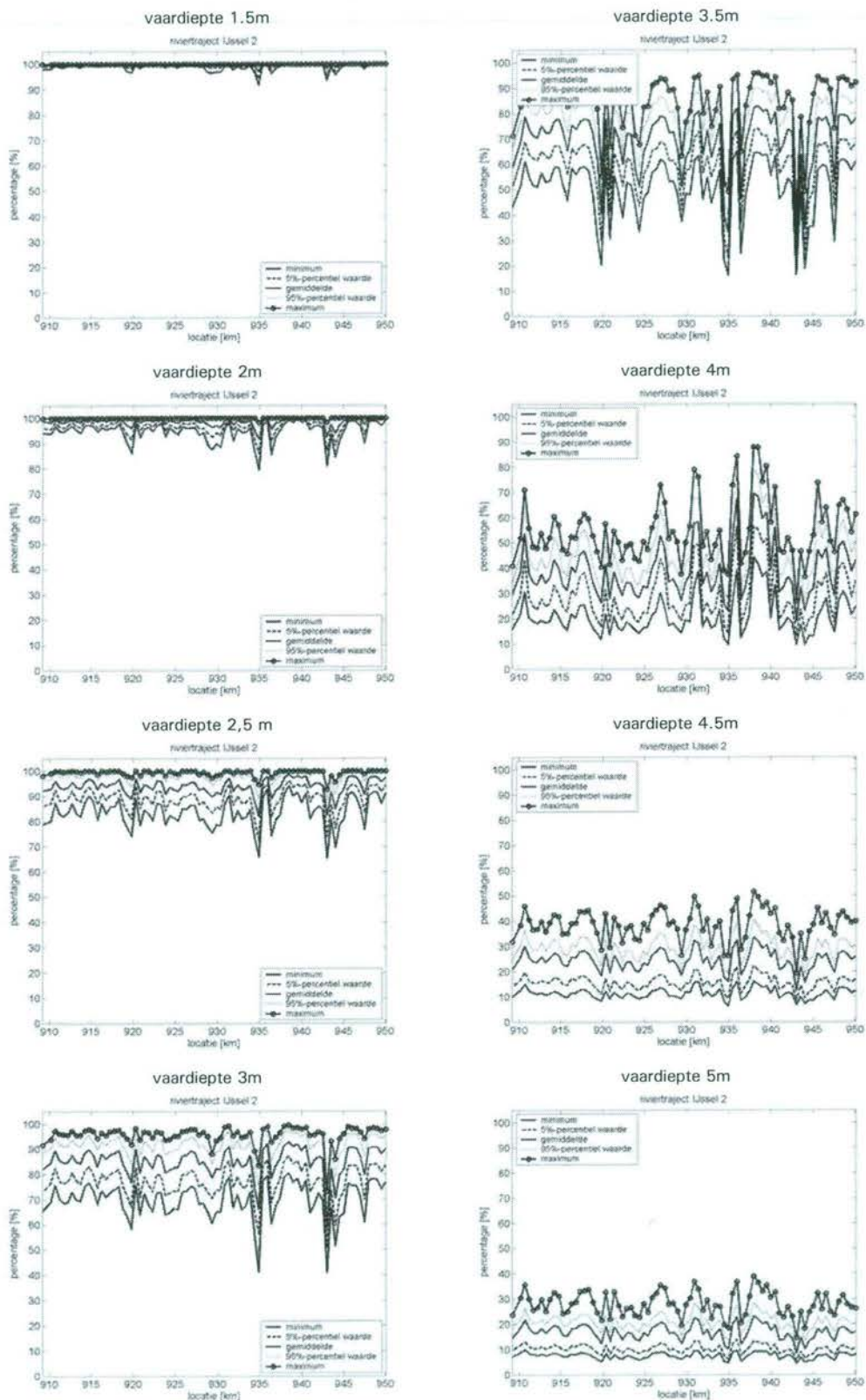


Figuur B.5-4. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject Waal 4.

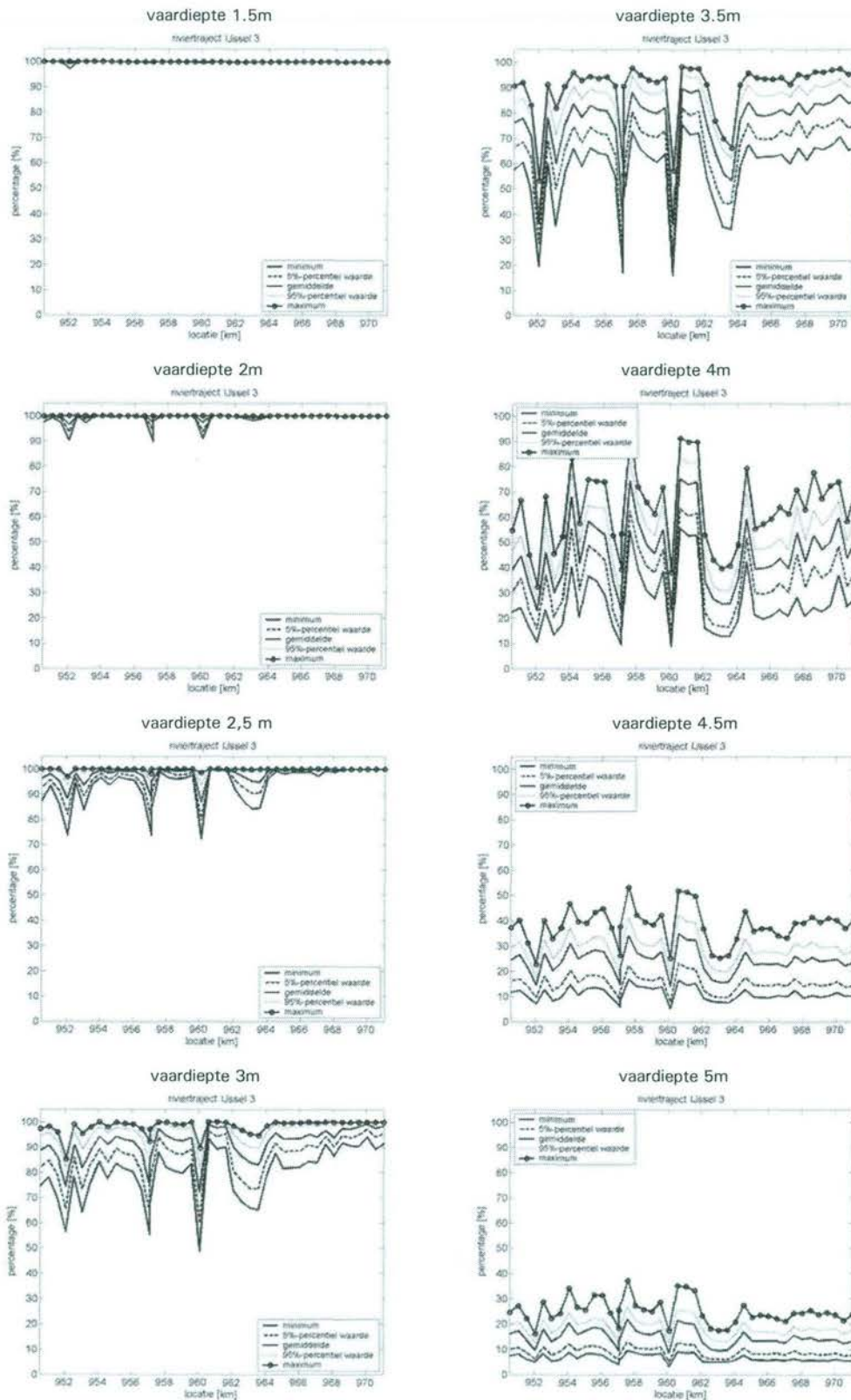


Figuur B.5-5. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject IJssel 1.



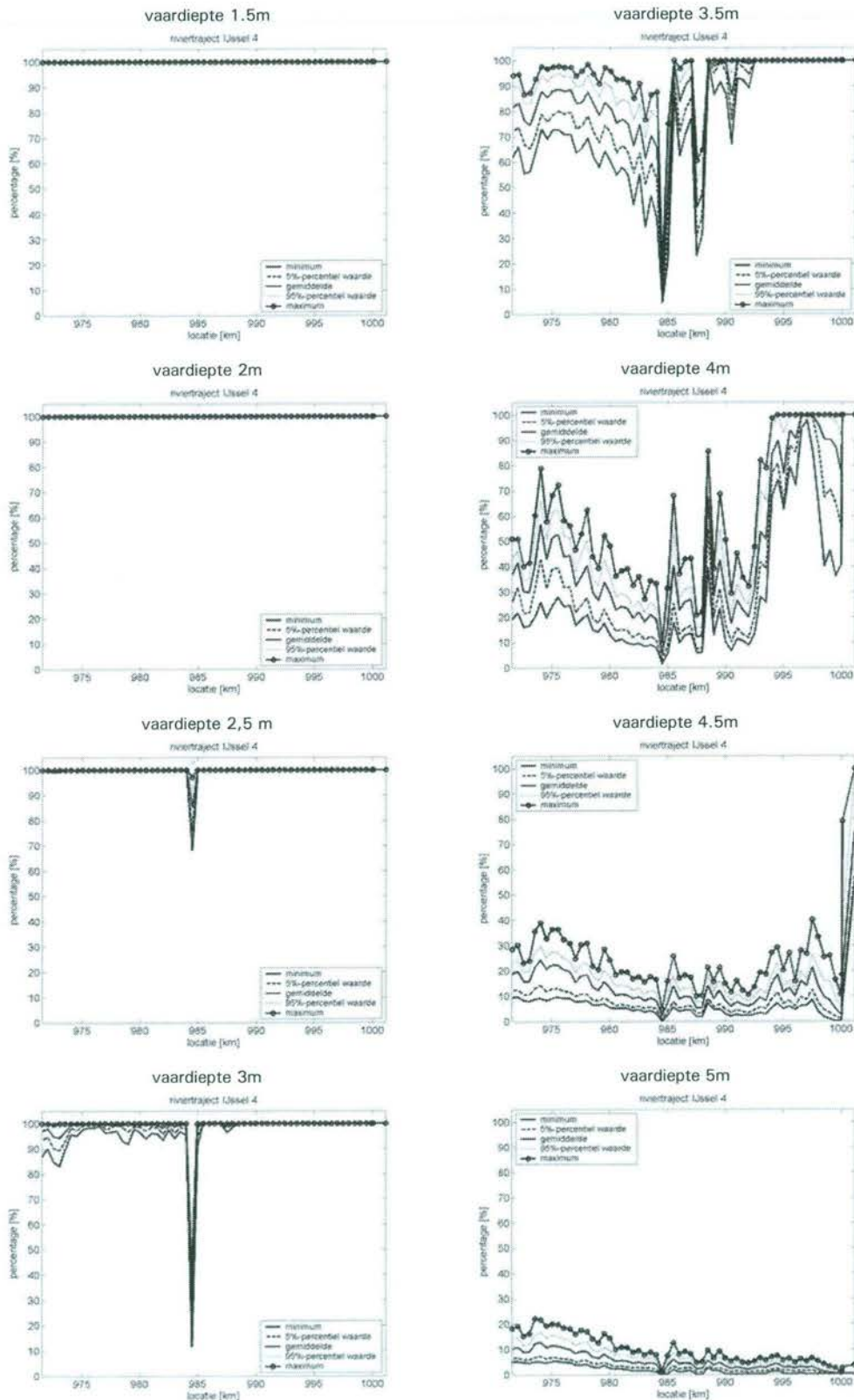


Figuur B.5-6. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject IJssel 2.



Figuur B.5-7. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject IJssel 3.



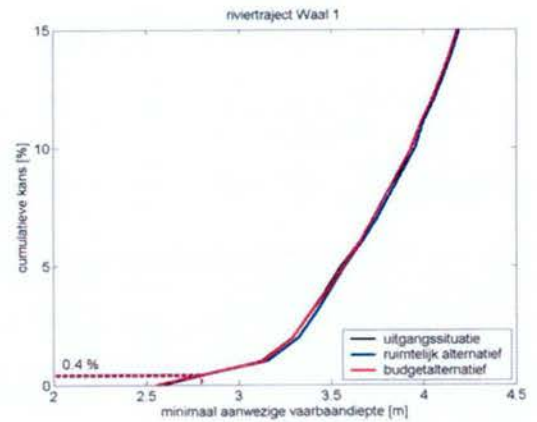
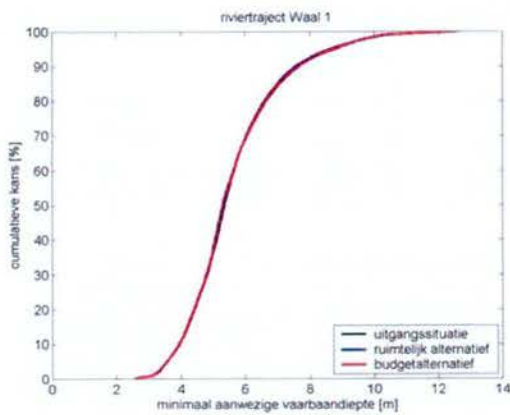
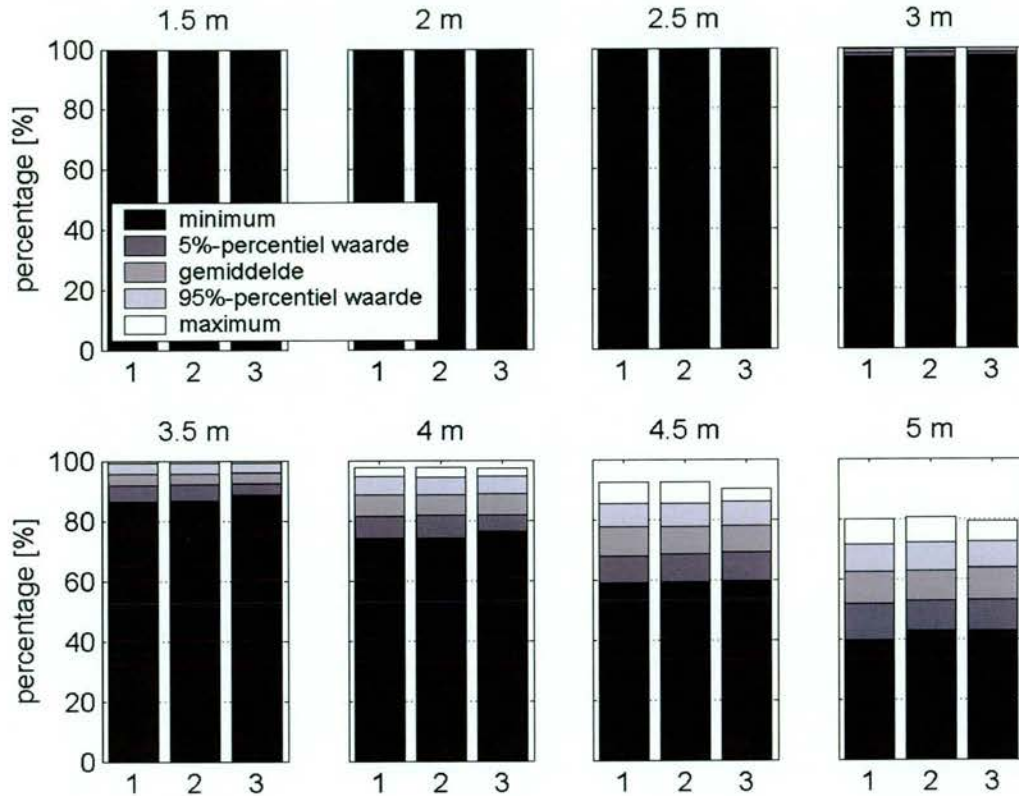


Figuur B.5-8. Statistische karakteristieken van het bevaarbaarheidspercentage per rivierlocatie op riviertraject IJssel 4.

## Bijlage 6: Effect RvdR-alternatieven op bevaarbaarheid

### Bevaarbaarheid Bovenrijn en Waal – Waal 1

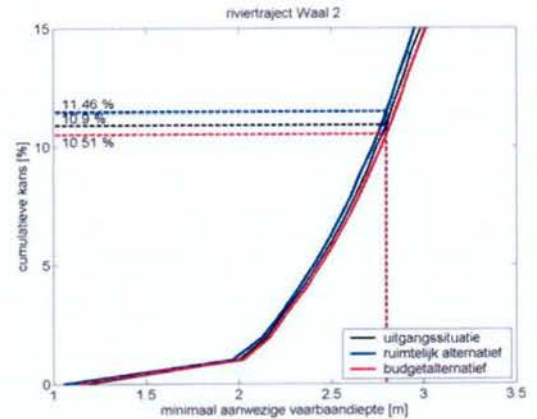
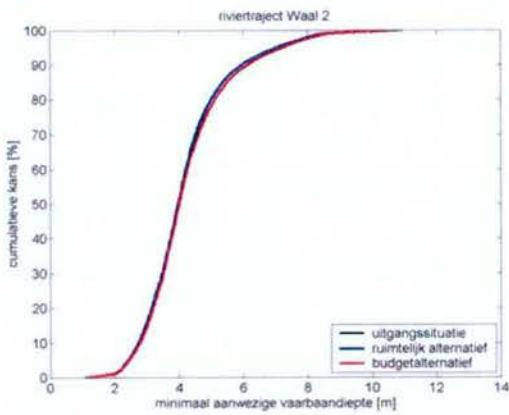
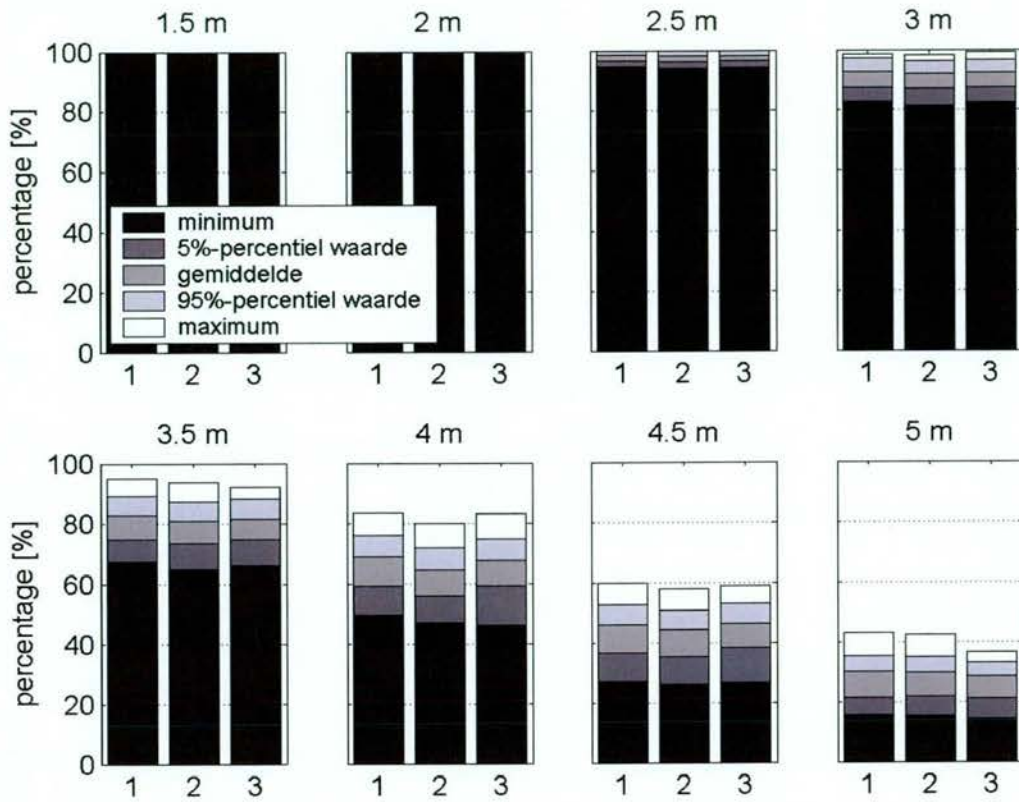
(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief





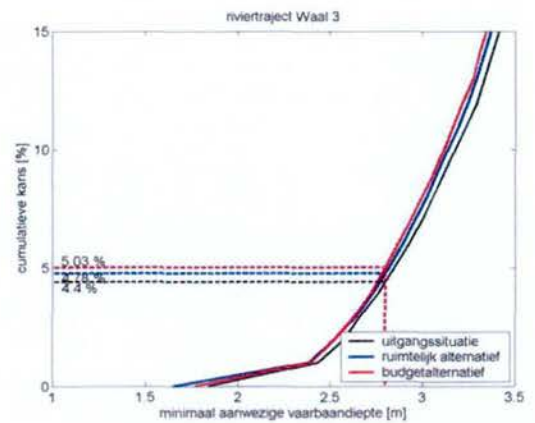
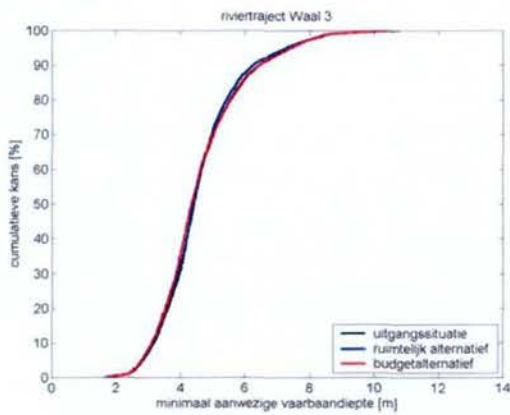
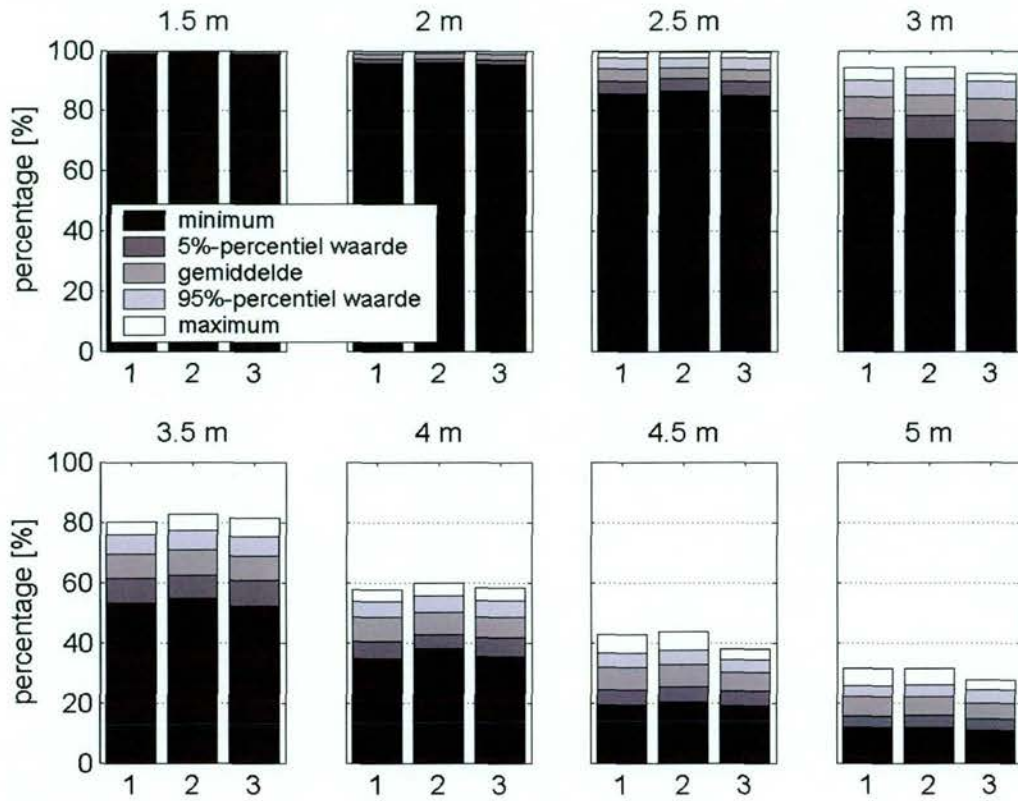
### Bevaarbaarheid Bovenrijn en Waal – Waal 2

(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief



### Bevaarbaarheid Bovenrijn en Waal – Waal 3

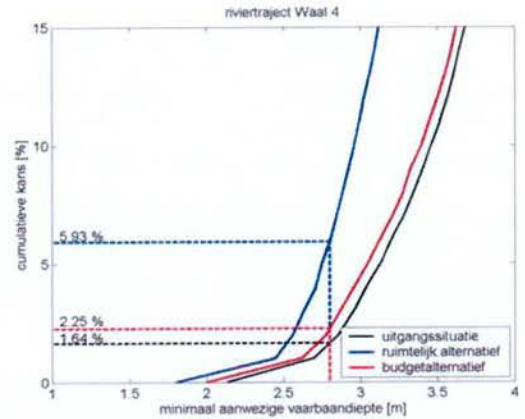
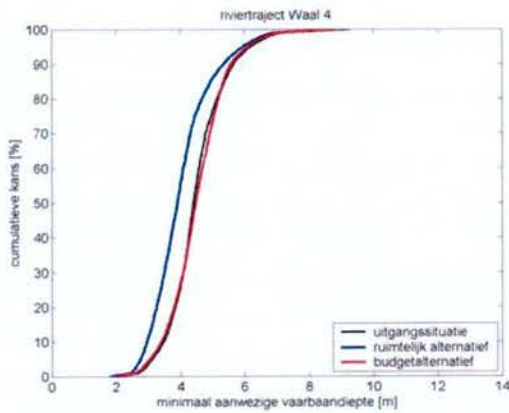
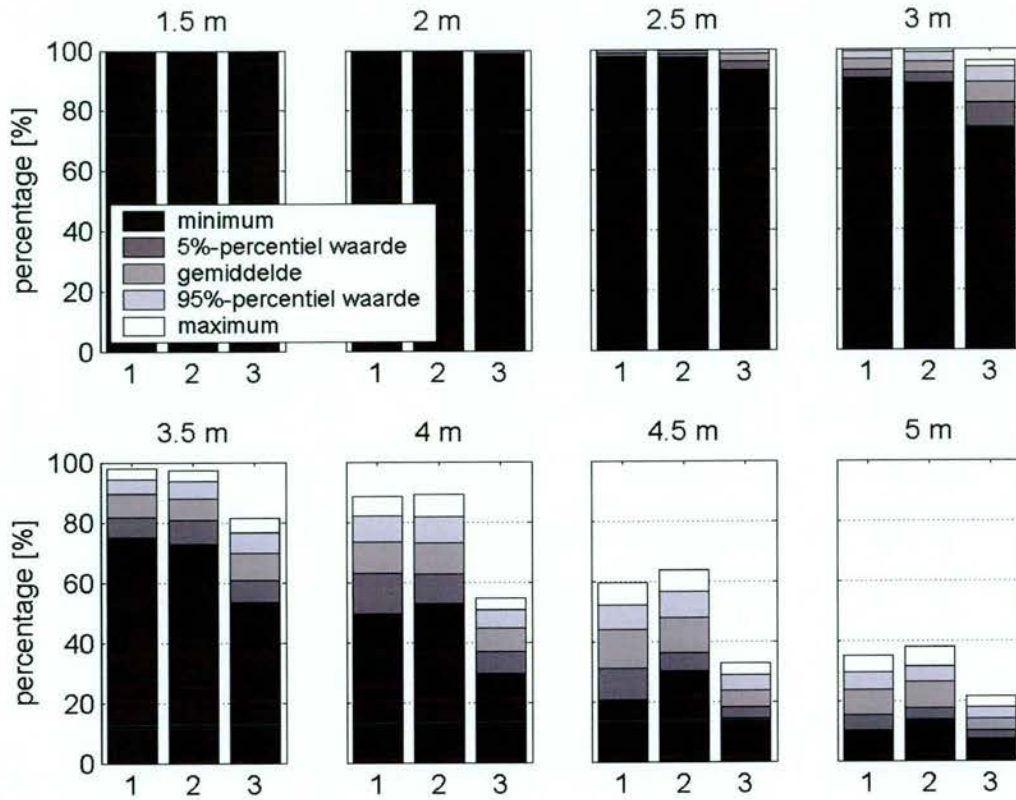
(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief





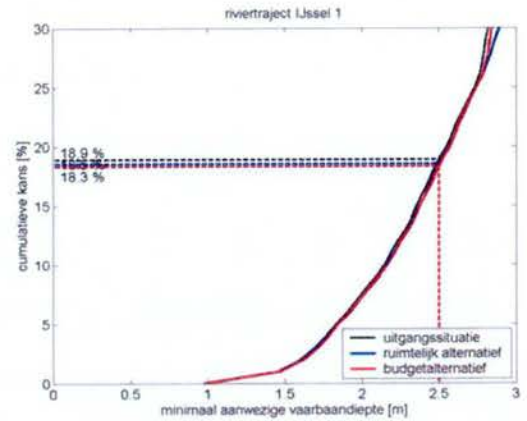
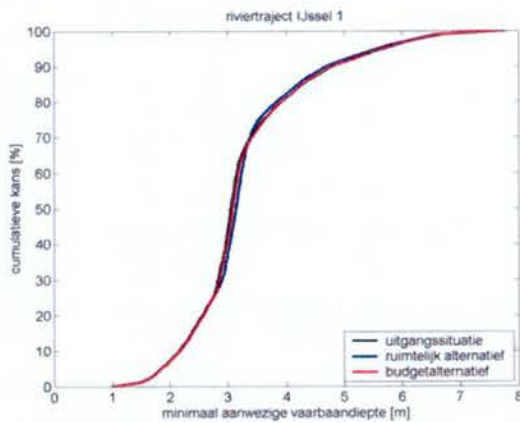
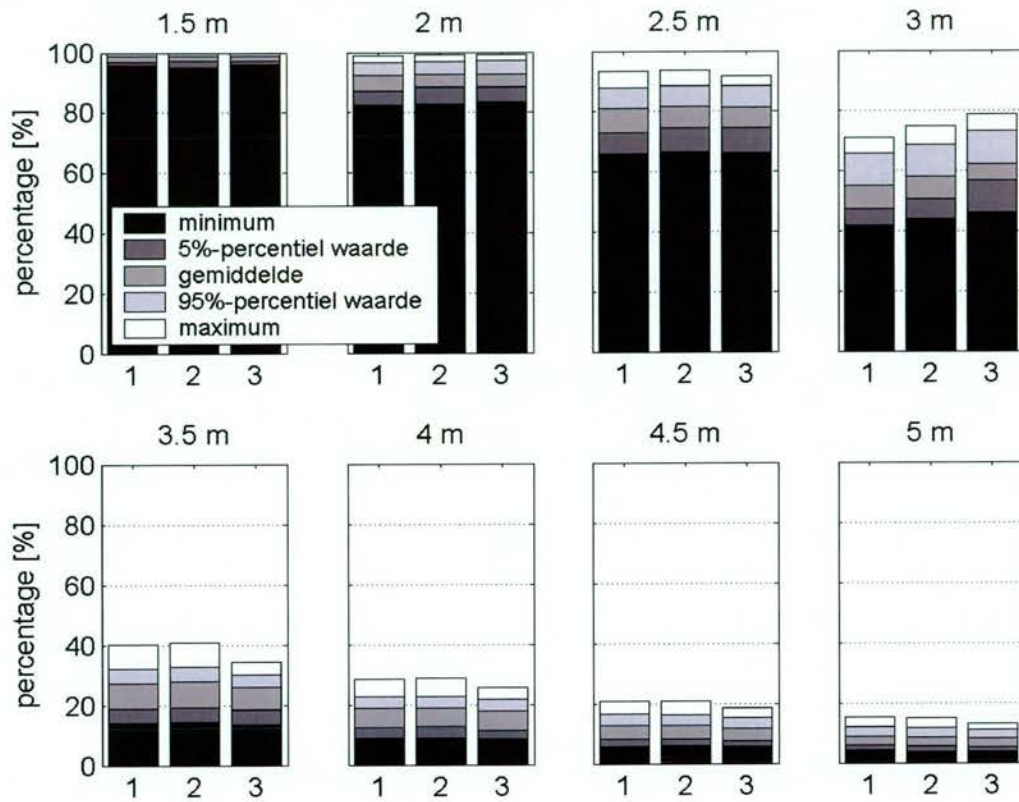
### Bevaarbaarheid Bovenrijn en Waal – Waal 4

(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief



### Bevaarbaarheid IJssel – IJssel 1

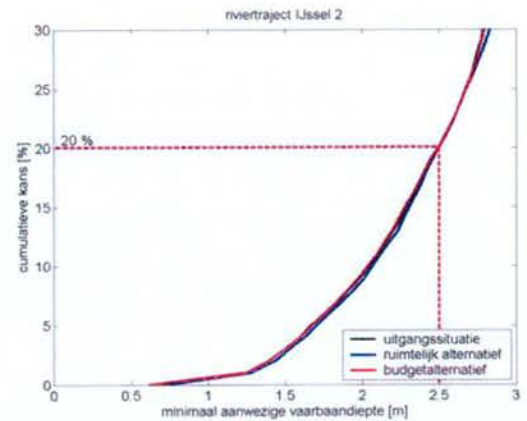
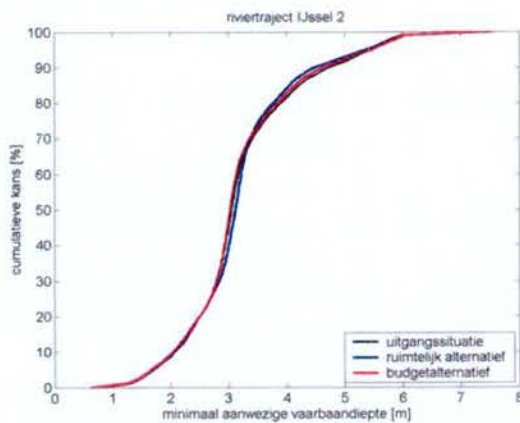
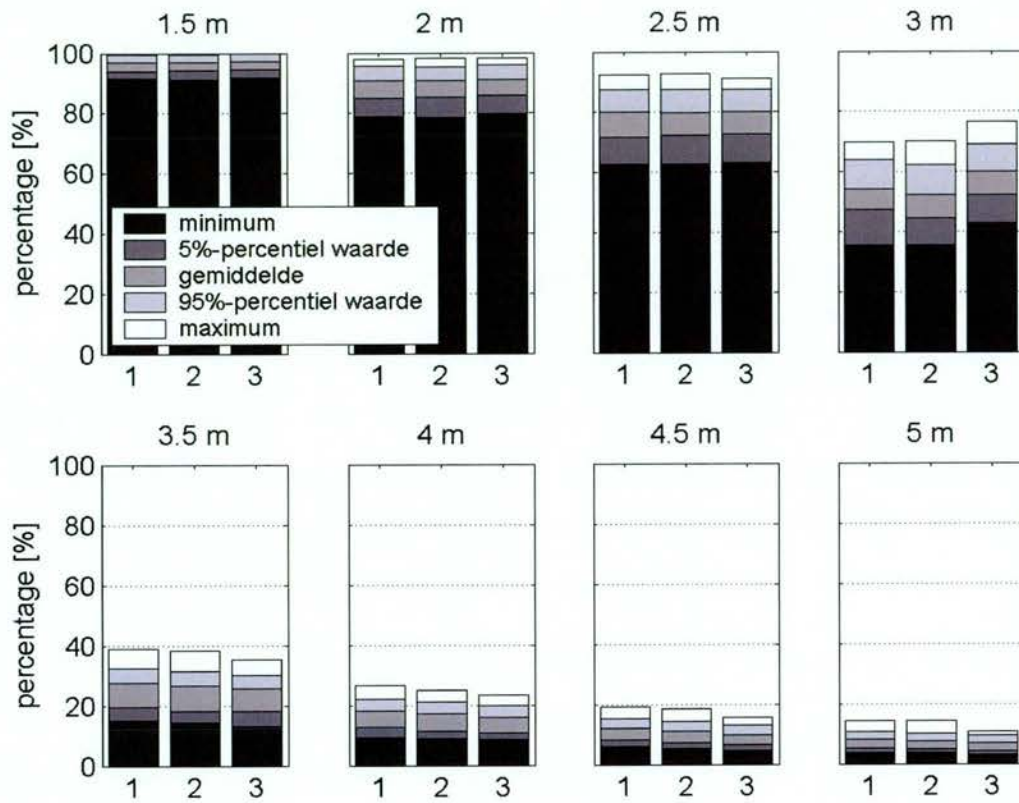
(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief





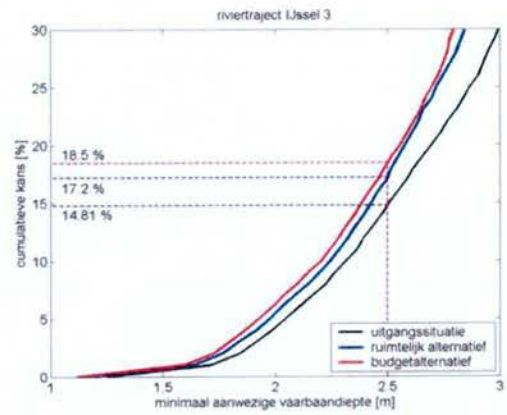
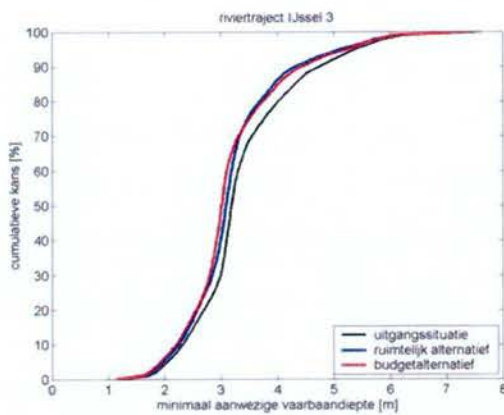
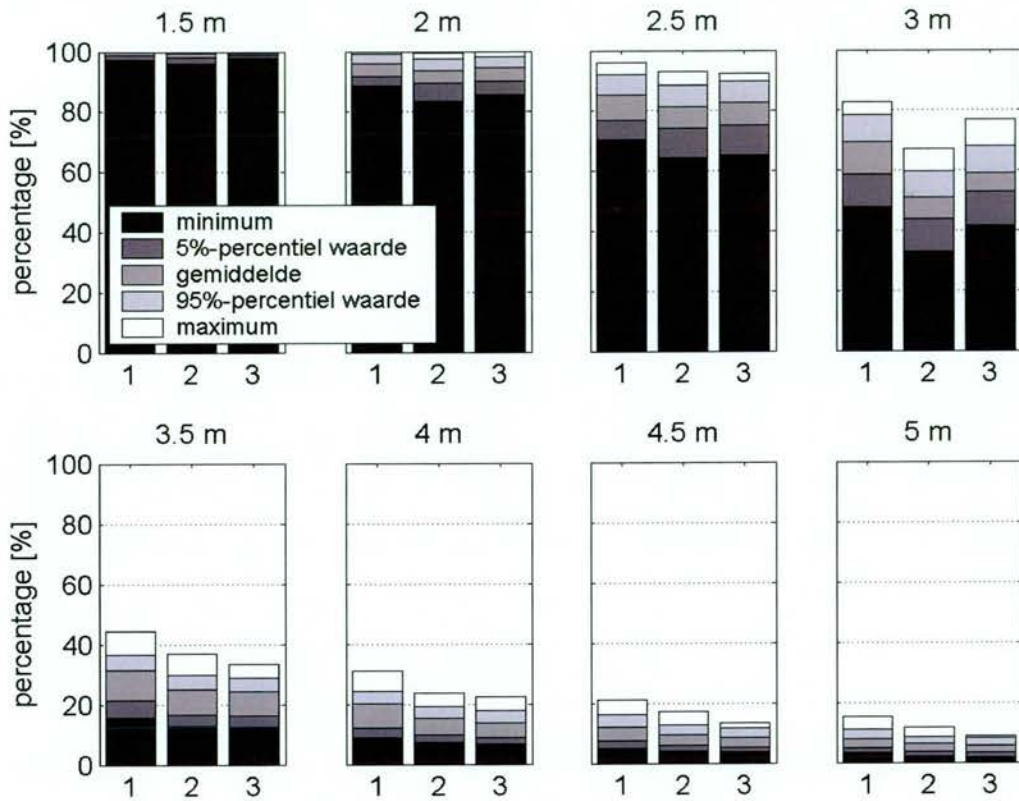
## Bevaarbaarheid IJssel – IJssel 2

(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief



### Bevaarbaarheid IJssel – IJssel 3

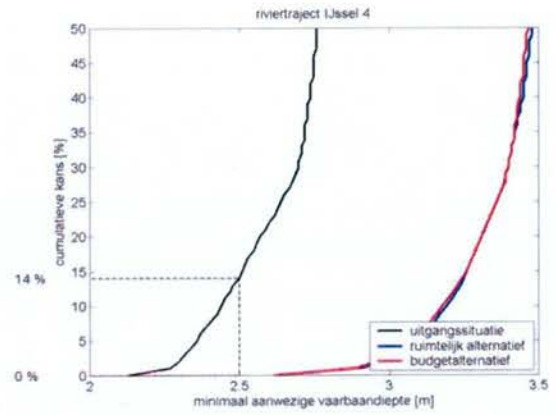
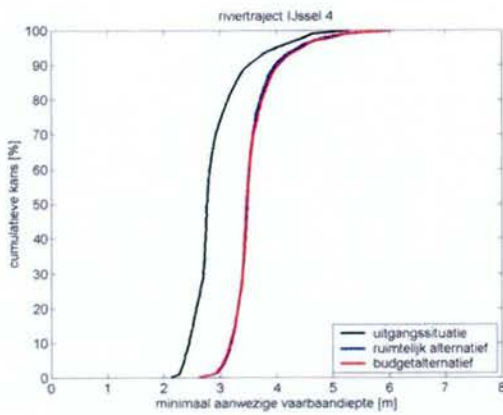
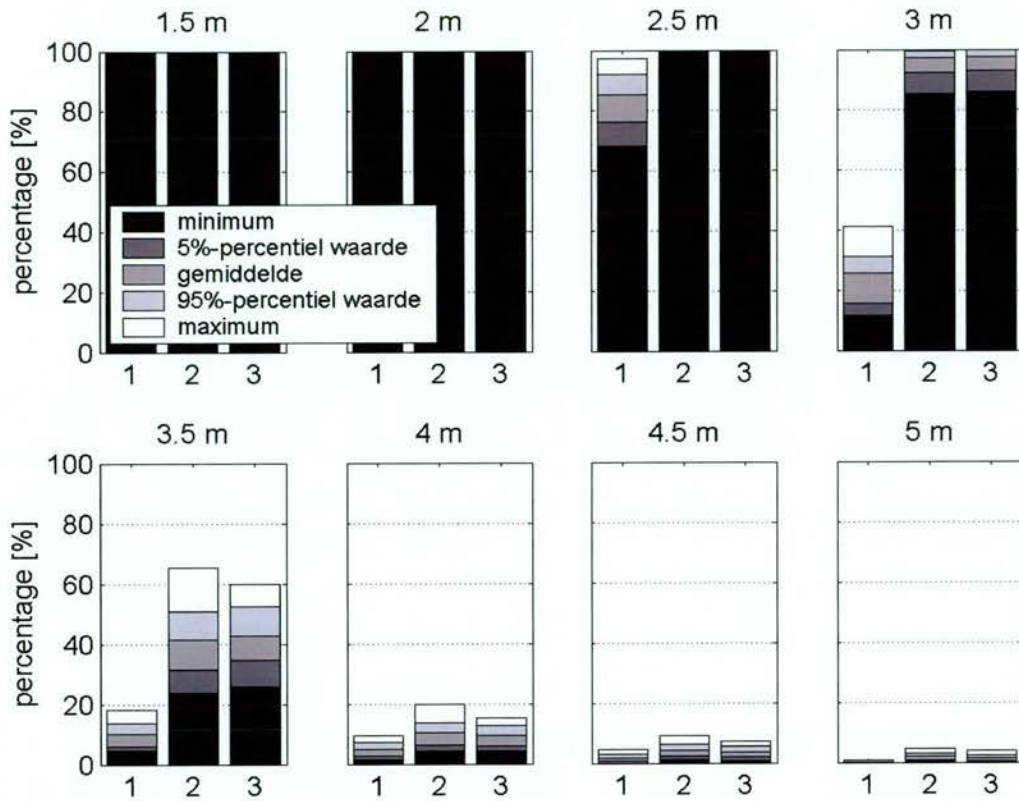
(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief





### Bevaarbaarheid IJssel – IJssel 4

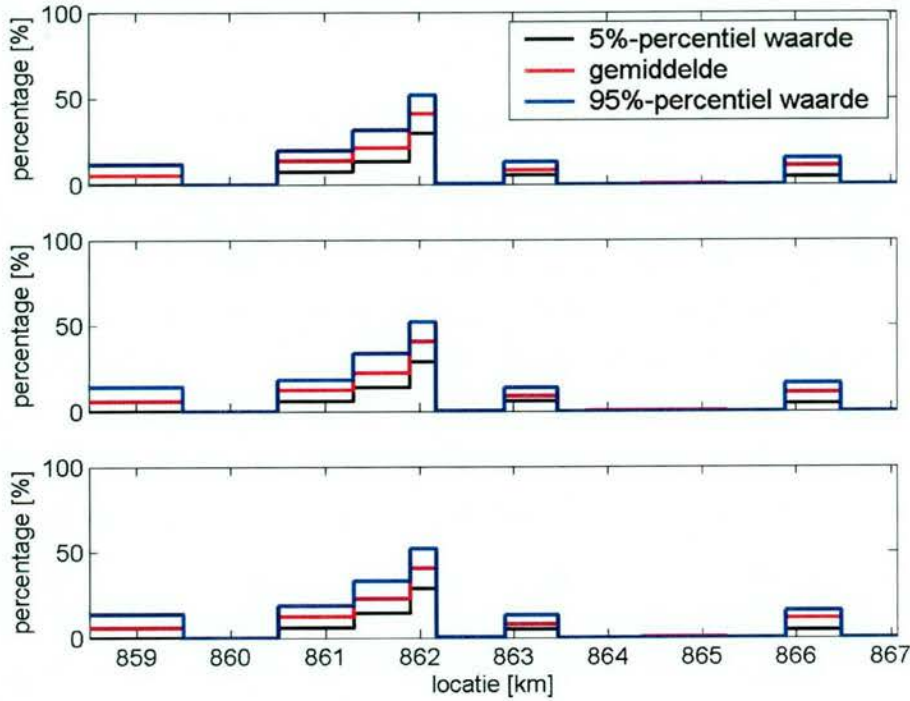
(1) uitgangssituatie; (2) budgetalternatief; (3) ruimtelijke alternatief



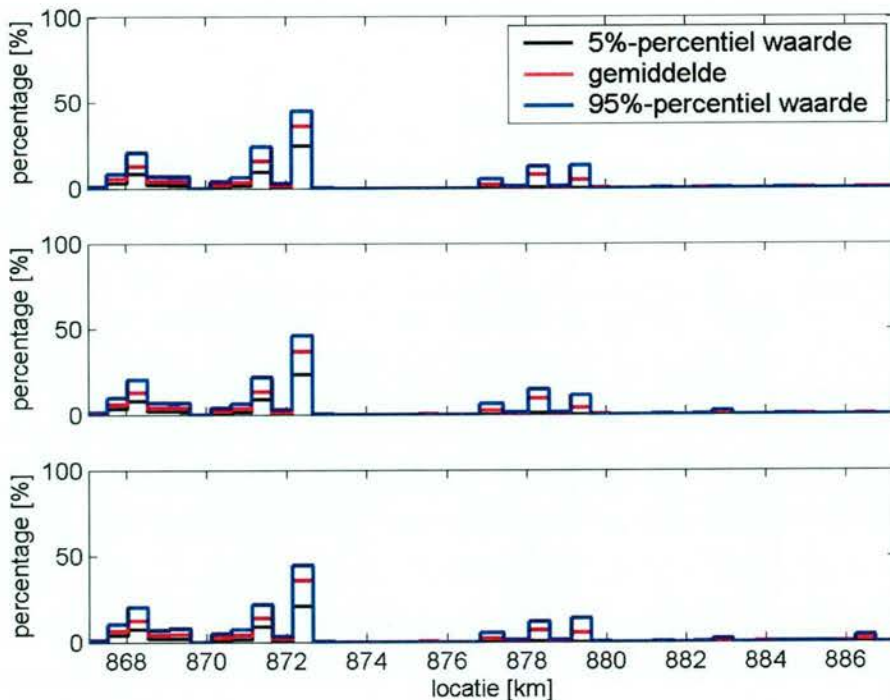
### Locaties maatgevende waterdiepte op Bovenrijn en Waal

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt voor alle RvdR-riviertrajecten in de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur).

a. Riviertraject Waal 1

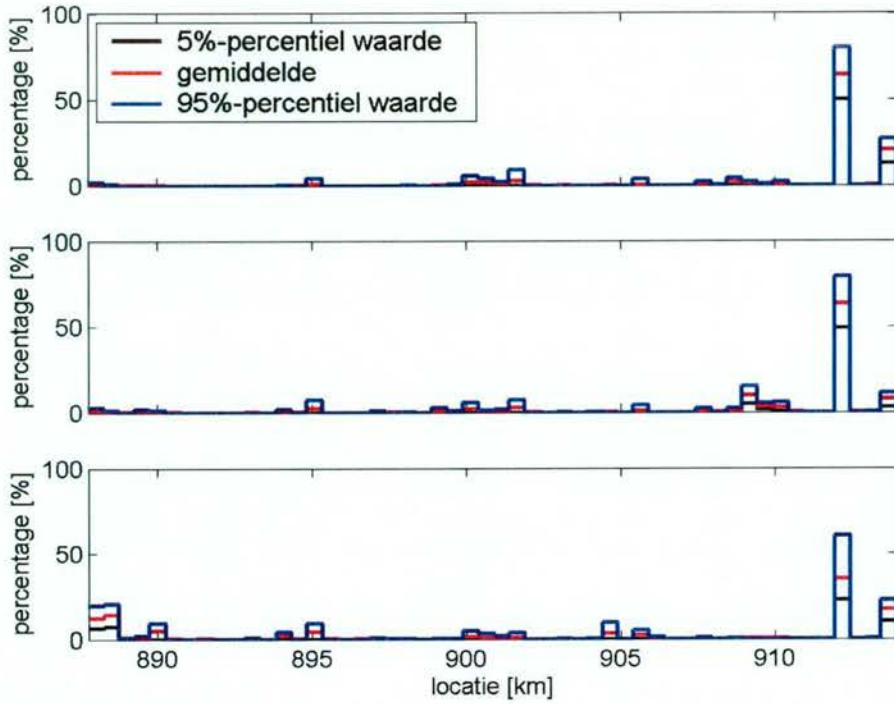


b. Riviertraject Waal 2

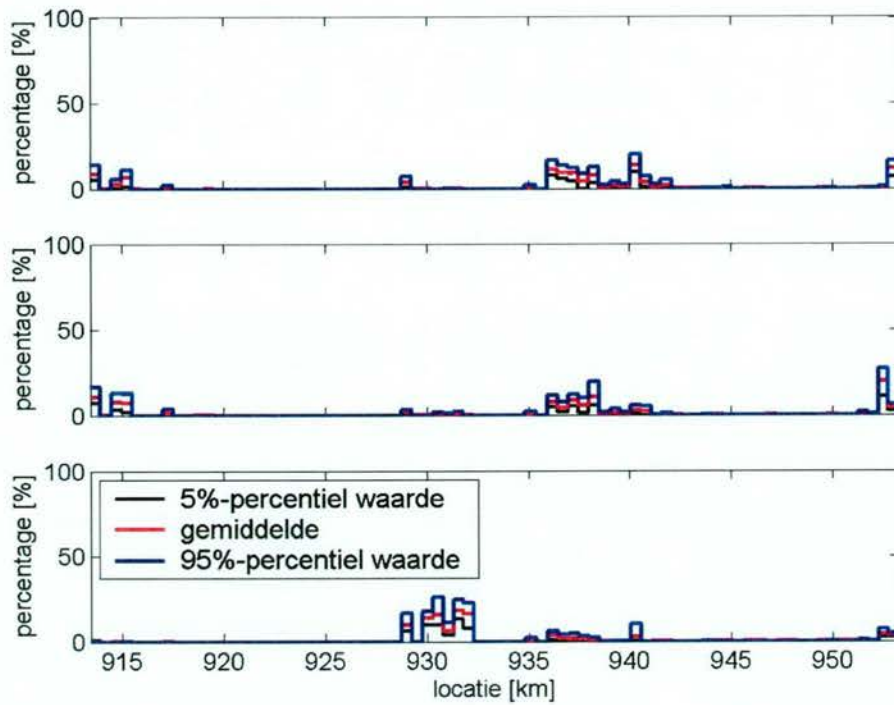




c. Riviertraject Waal 3



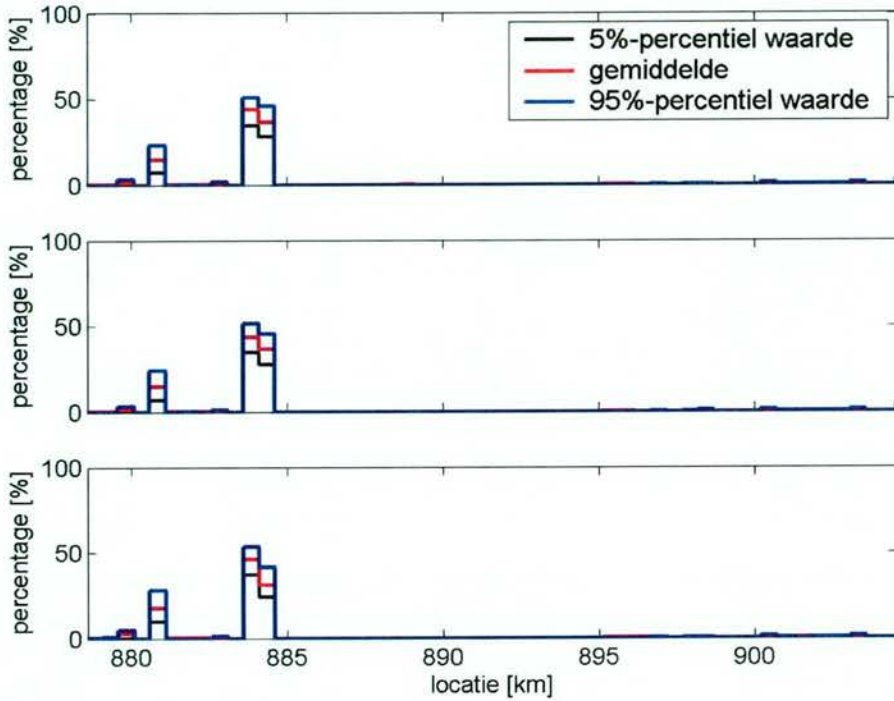
d. Riviertraject Waal 4



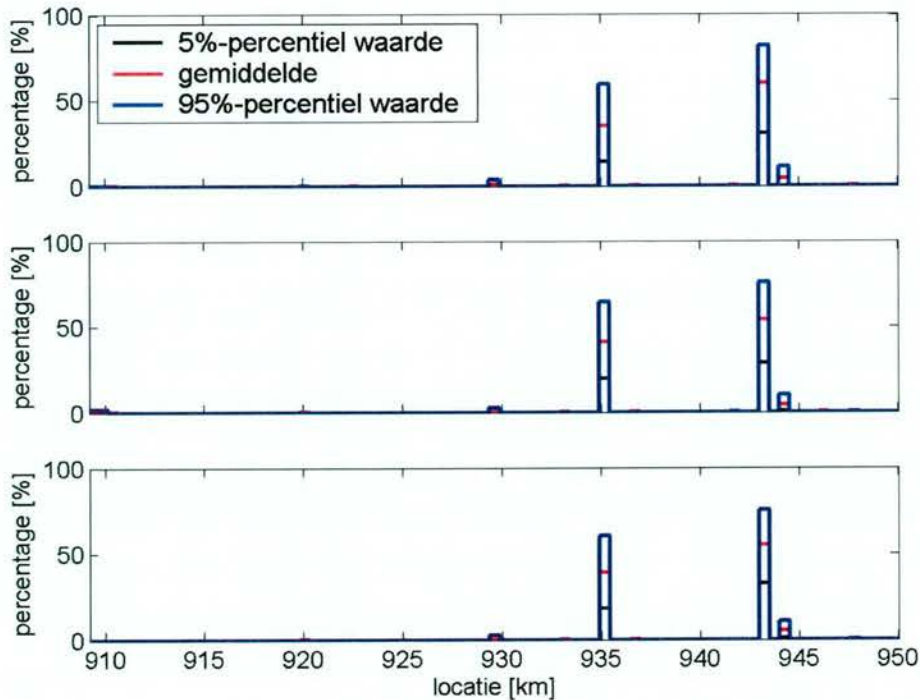
**Locaties maatgevende waterdiepte op de IJssel**

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie x bevindt voor alle RvdR-riviertrajecten in de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur).

a. Riviertraject IJssel 1

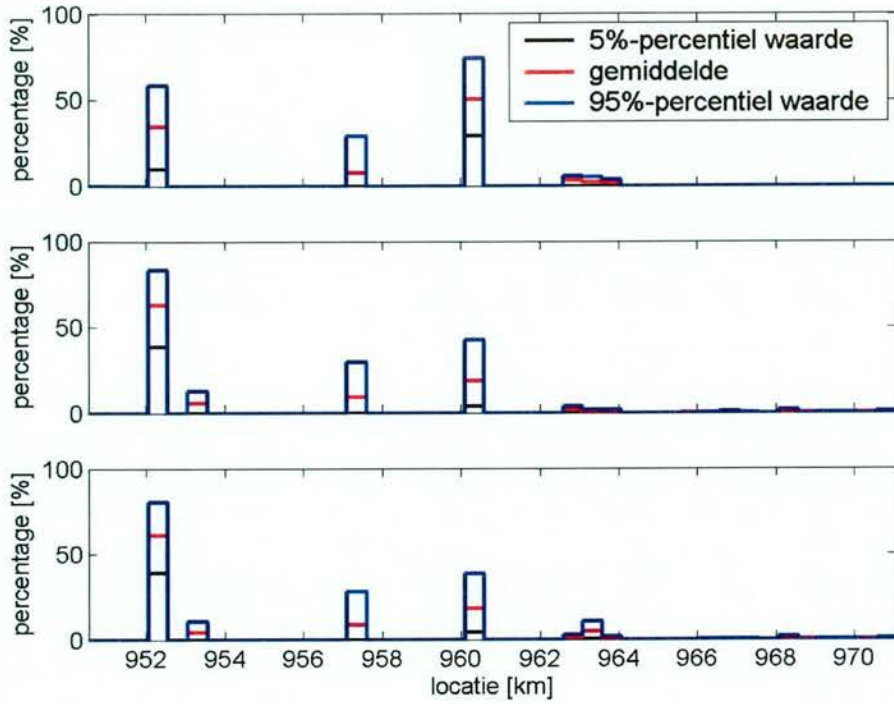


b. Riviertraject IJssel 2

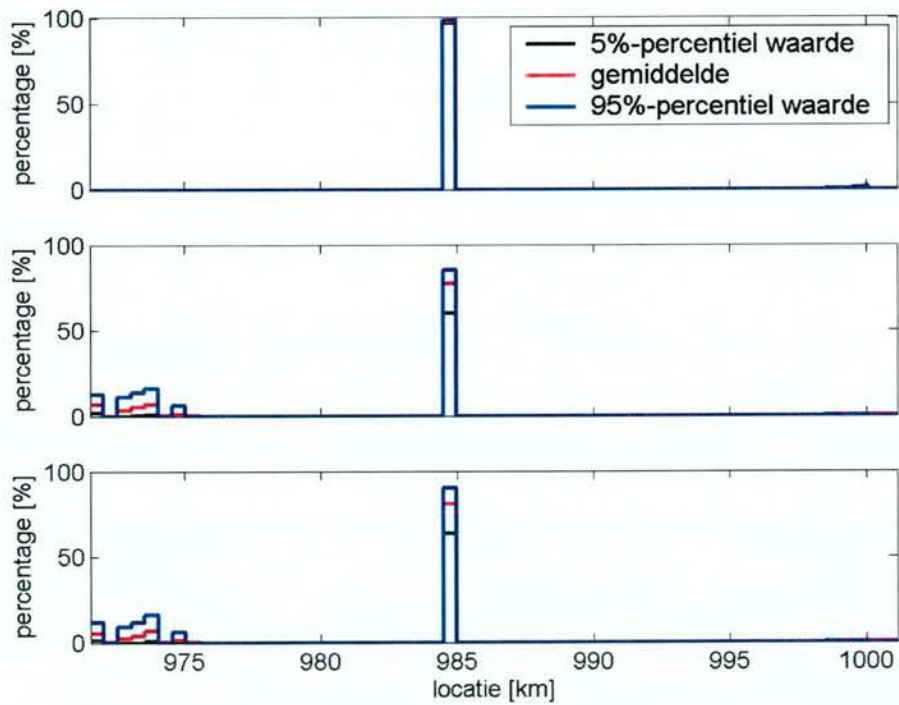




c. Riviertraject IJssel 3

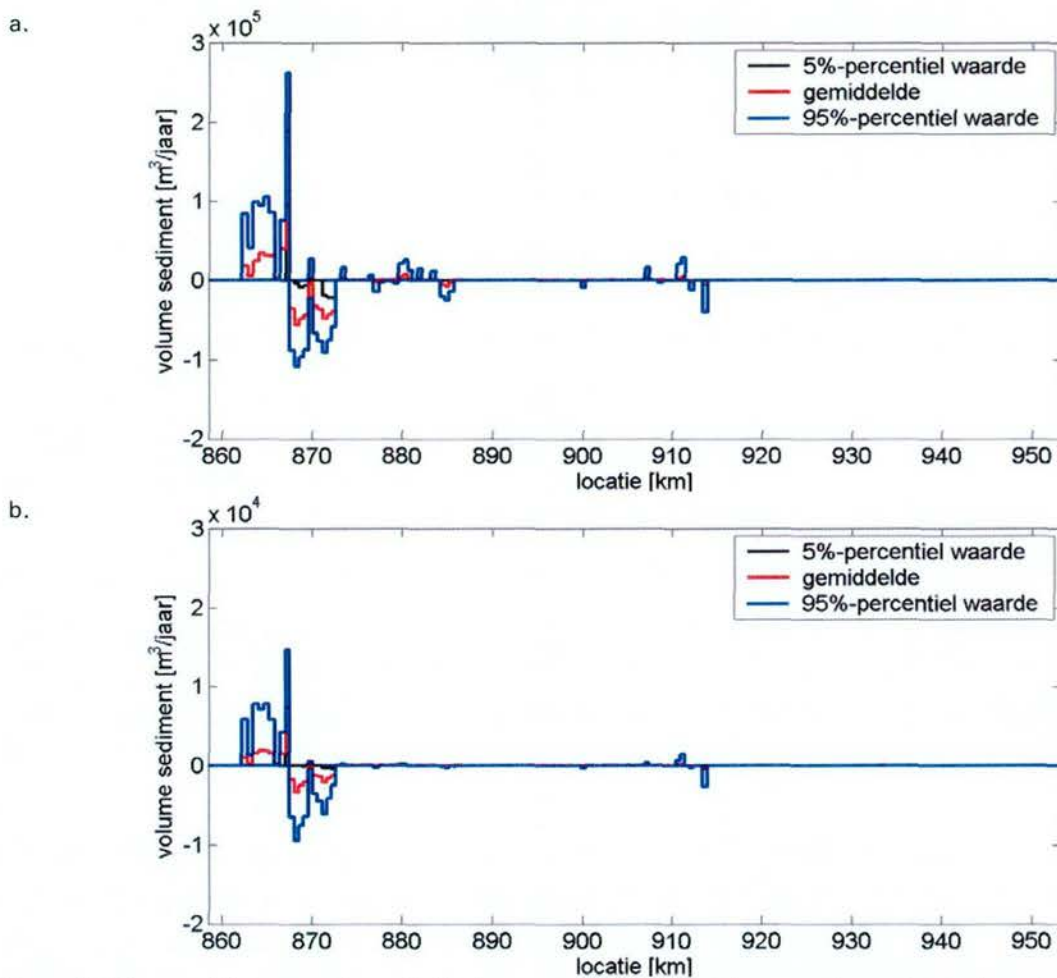


d. Riviertraject IJssel 4



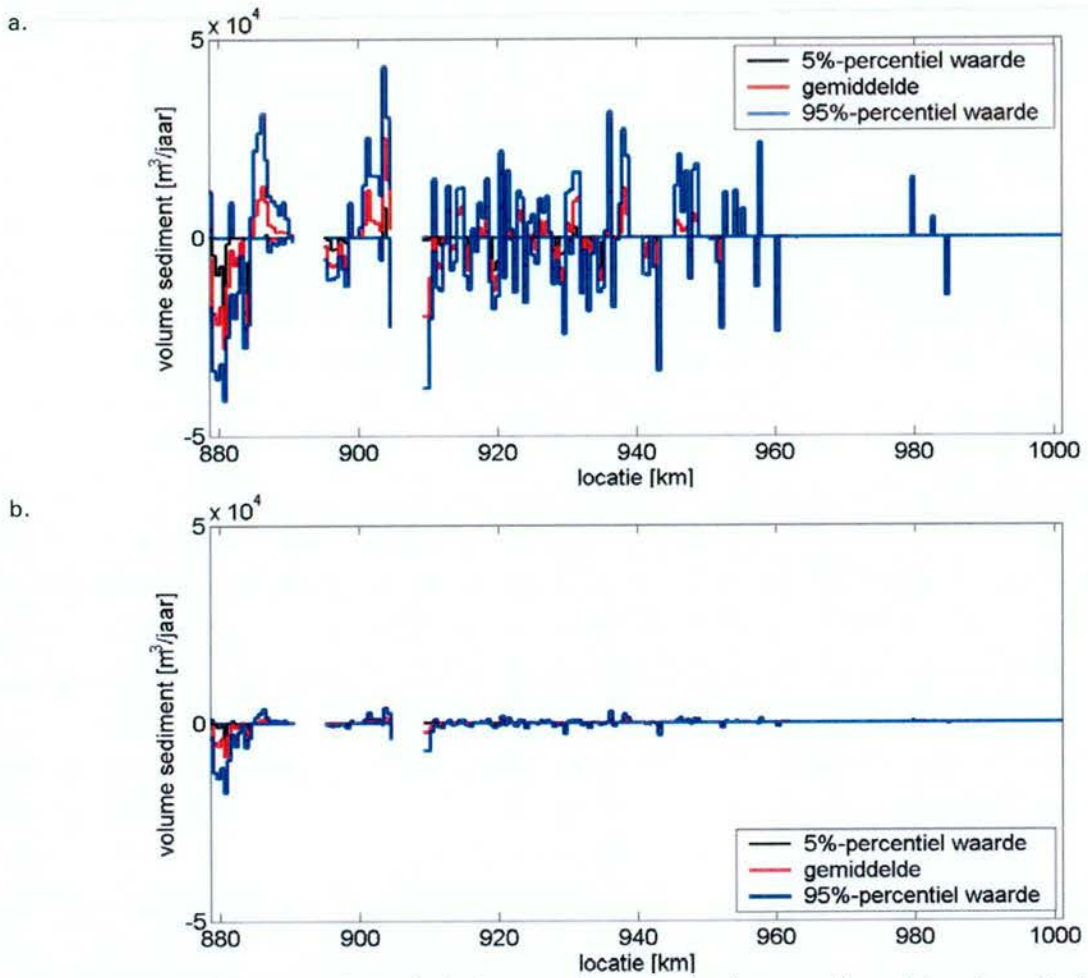
## Bijlage 7: Onderhoudsbaggerwerk

Verskil tussen theoretische baggervolumes en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken

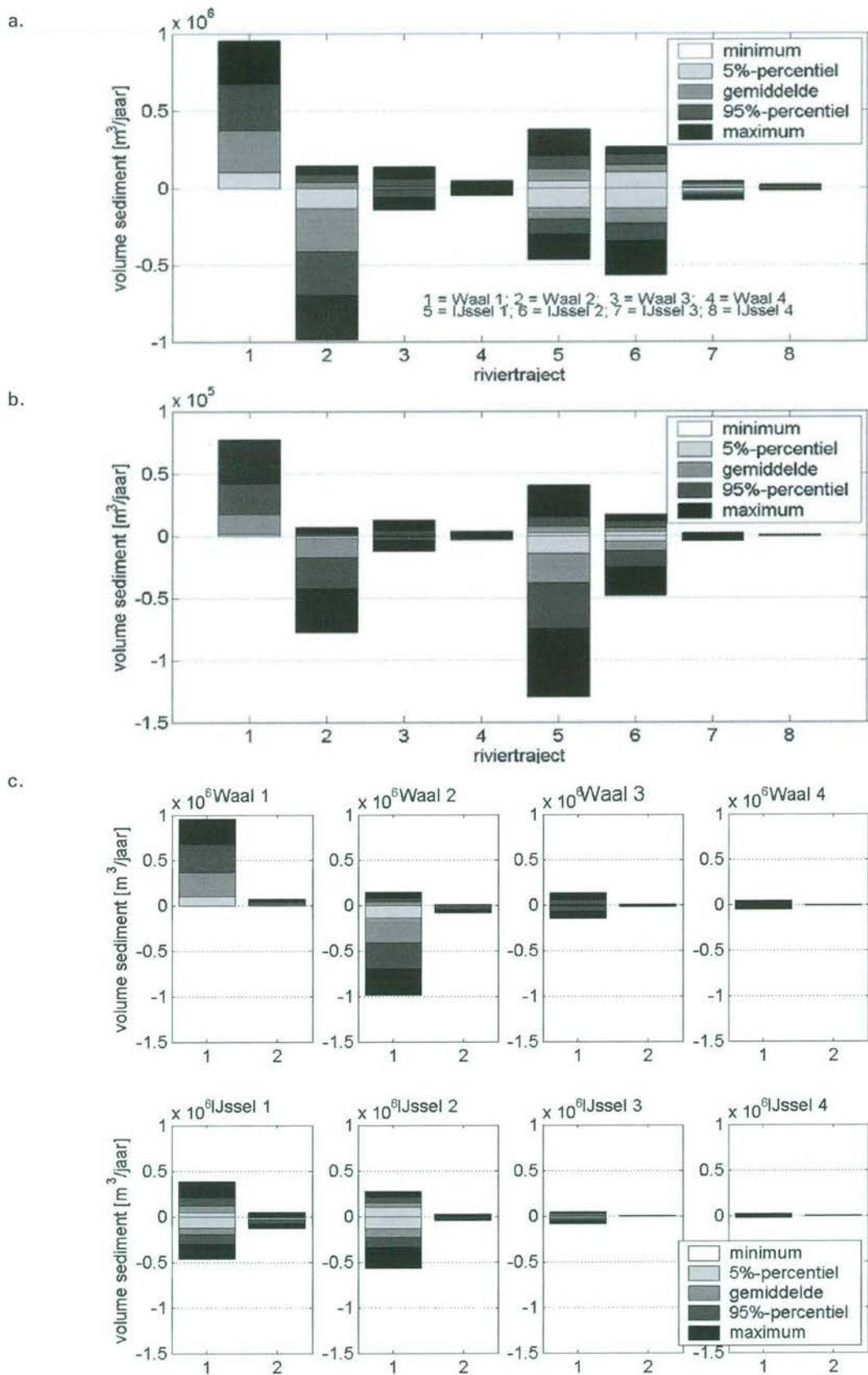


Figuur B.7-1. verschil tussen theoretische baggervolumes en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken per locatie in de Bovenrijn en de Waal.



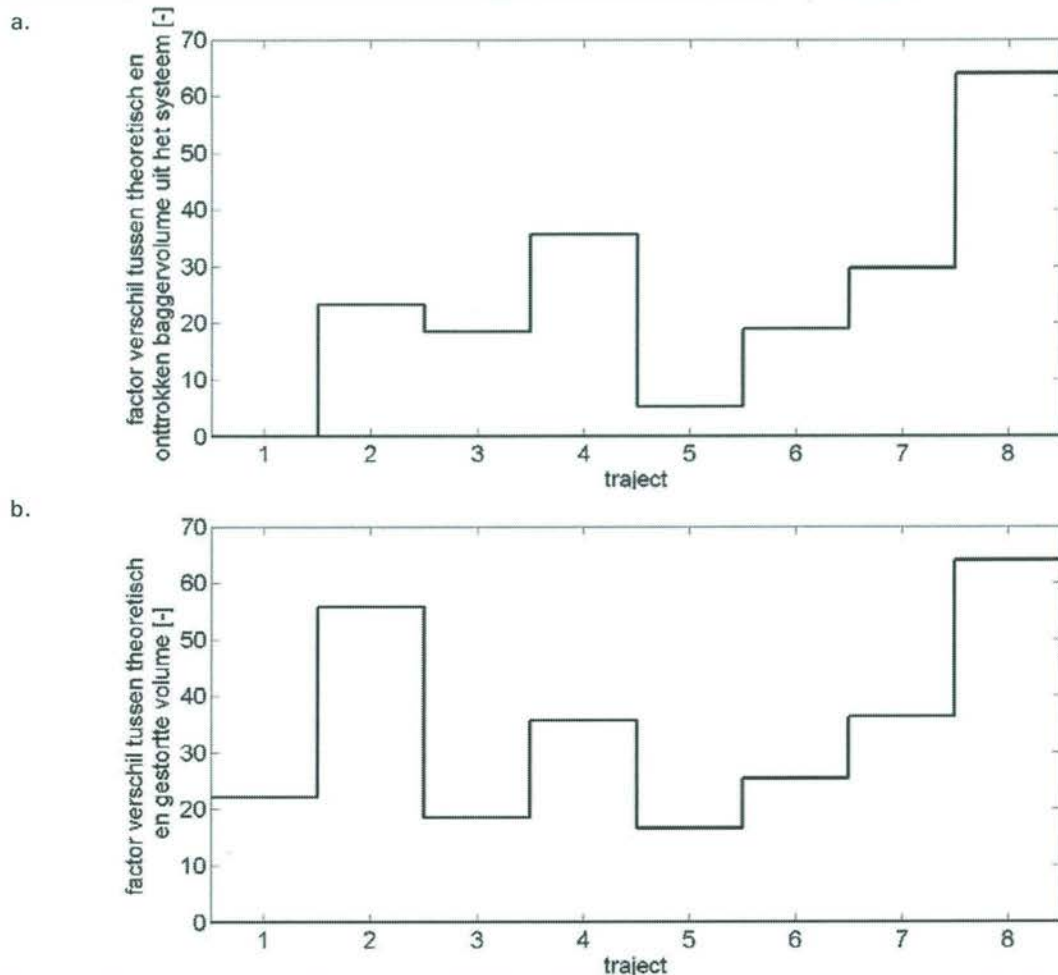


Figuur B.7-2. verschil tussen theoretische baggervolumes en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken per locatie in de IJssel.



Figuur B.7-3. (a) theoretische baggervolumes, (b) baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem is onttrokken en (c) theoretische baggervolumes (1) en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem is onttrokken (2) per riviertraject.





*Figuur B.7-4. factor verschil tussen gemiddelde (a) theoretische baggervolumes en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem is onttrokken per riviertraject en (b) theoretische stortvolumes en het stortvolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem is gestort per riviertraject.*

Er is onderscheid gemaakt tussen het theoretisch vereiste baggervolume (zie formule 5 en gearceerde driehoekje in Figuur 2-3) en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie wordt onttrokken (zie formule 6). Door het gebruik van een 1D-model worden zowel de morfologische veranderingen als de sedimentonttrekkingen en -toevoegingen gespreid over de sedimenttransporterende breedte van het zomerbed. Indien we 'slechts' de theoretische vereiste volumes verwijderen en terugstorten zal op het eerstvolgende tijdstip weer een scheepvaartprobleem worden geconstateerd en zal de bevaarbaarheid van de rivier niet voldoende verbeteren. Daarom is besloten dat we de rivier over de gehele sedimenttransporterende breedte verdiepen. Dit leidt tot een overschatting van de baggervolumes. Het onttrokken baggervolume is bovenstrooms van de baggerlocatie in de rivier teruggestort conform de beschreven methodiek. De analyse beperkt zich tot het theoretisch vereiste baggervolume, omdat deze volumes dicht bij de volumes aansluiten die in werkelijkheid uit de rivier worden onttrokken.

In deze Bijlage wordt ingegaan op het verschil tussen de theoretische baggervolumes en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken. De overschatting van het theoretische baggervolumes verschilt per riviertraject. Op de IJssel neemt het verschil tussen de theoretische baggervolume en het baggervolume dat gedurende de modelsimulatie uit het systeem wordt onttrokken in benedenstroomse richting toe. Dit komt doordat de normaalbreedte en dus de sedimenttransporterende breedte in

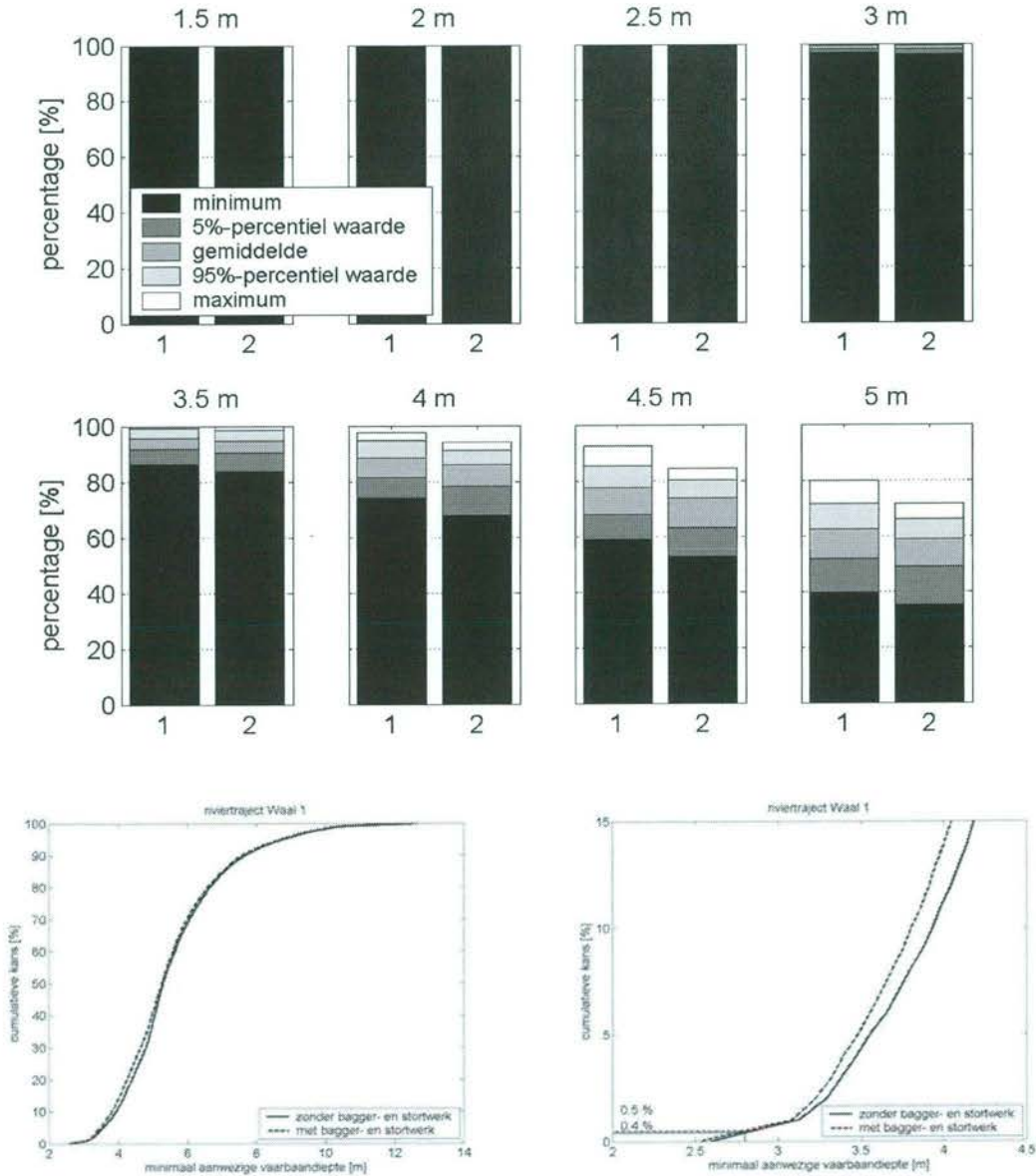
benedenstroomse richting toeneemt, waardoor het verschil tussen de baggervolumes groter wordt. Het verschil tussen de gemiddelde volumes kan oplopen tot een factor 60.



# Bijlage 8: effect onderhoudsbaggerwerk op bevaarbaarheid

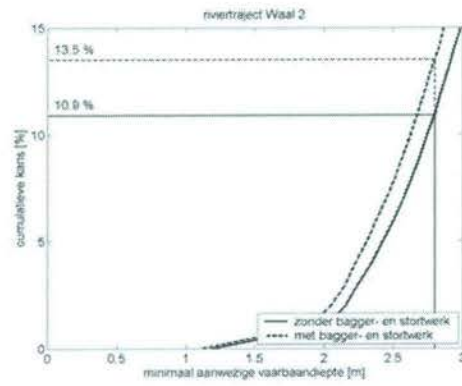
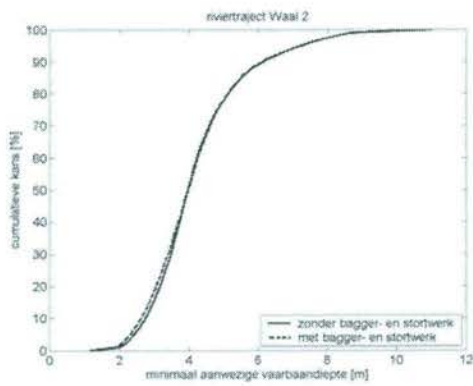
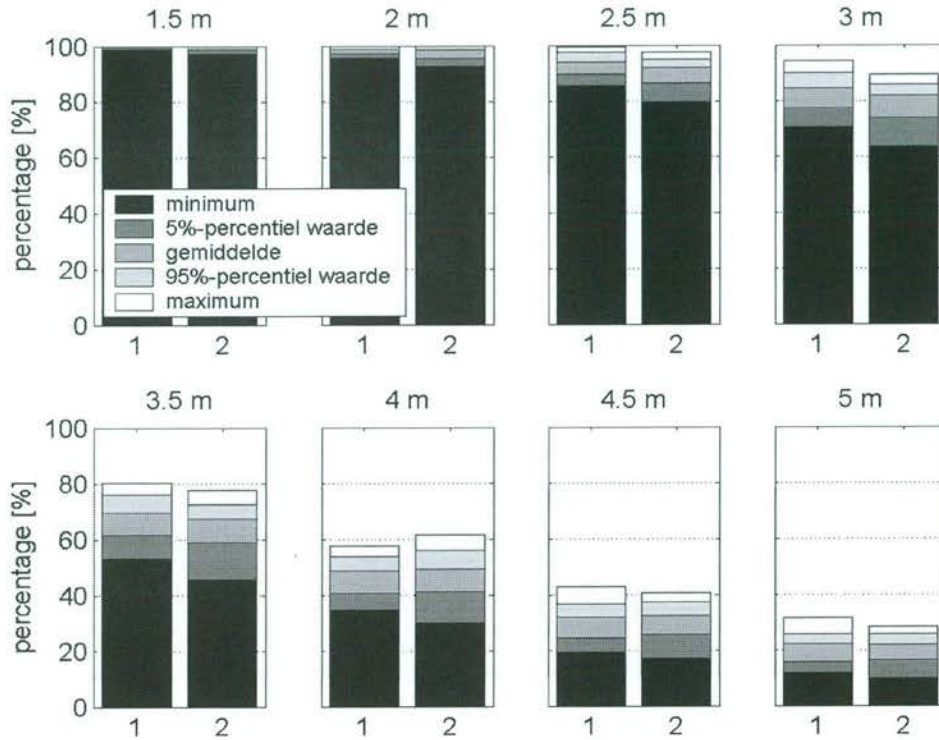
## Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - Waal 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - Waal 2

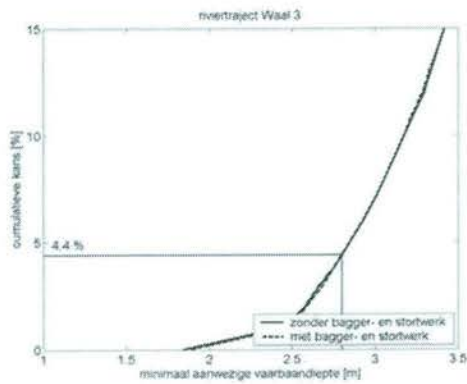
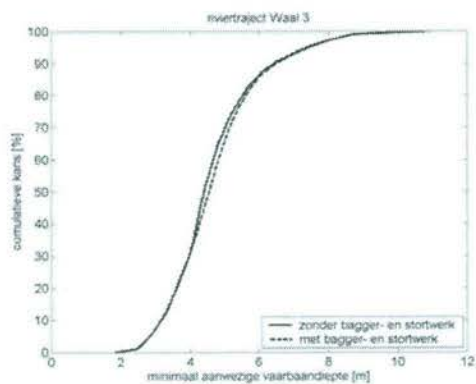
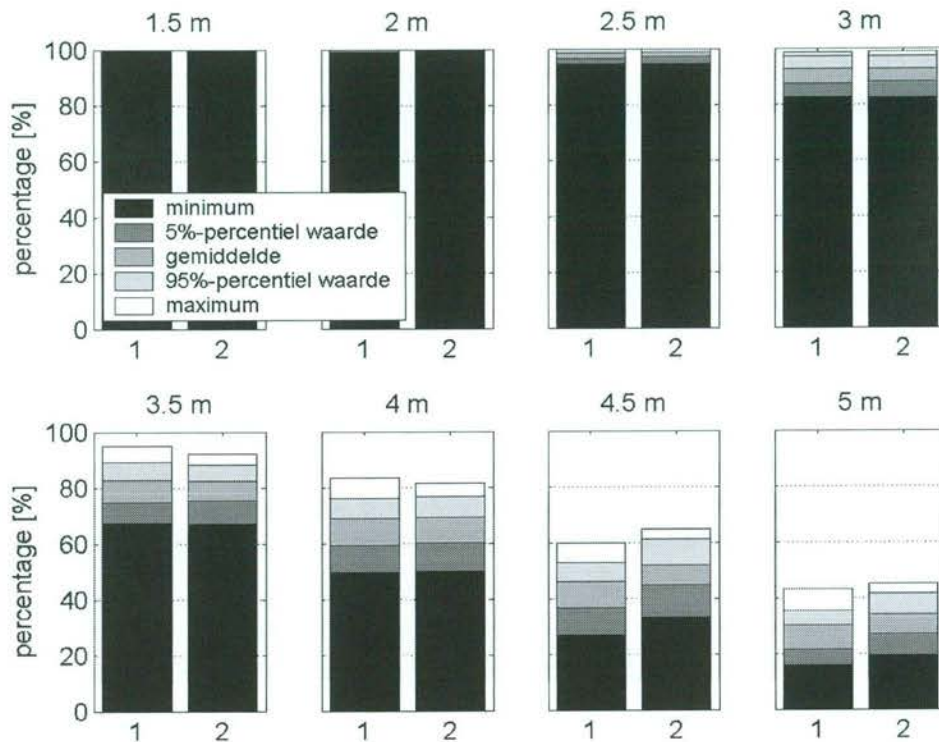
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





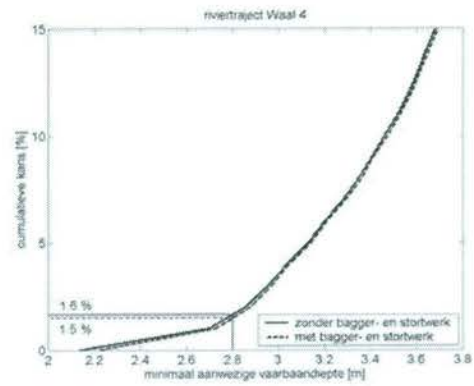
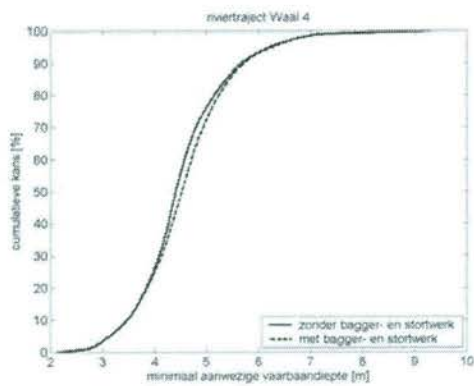
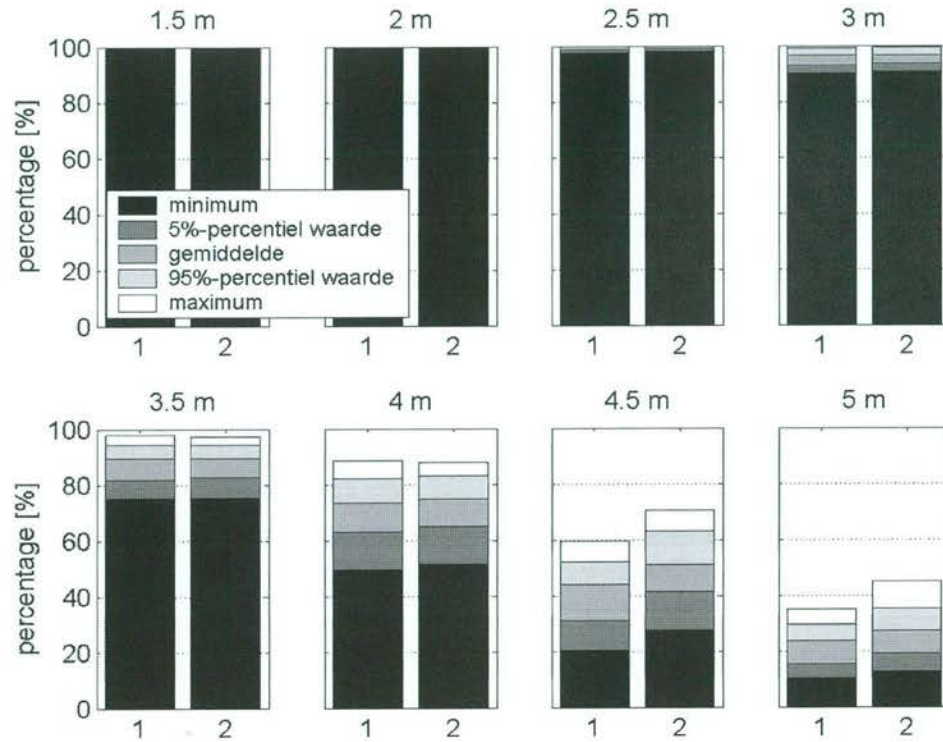
### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - Waal 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - Waal 4

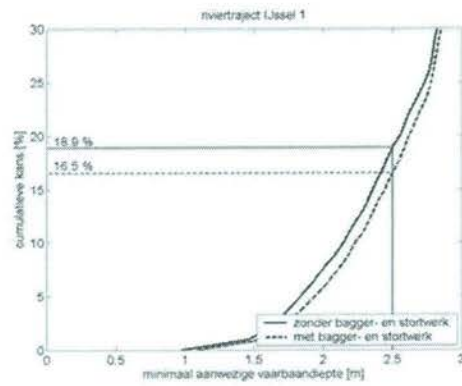
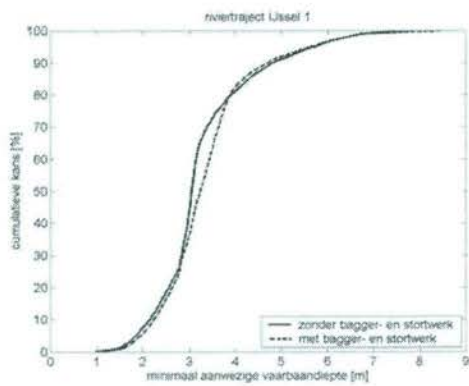
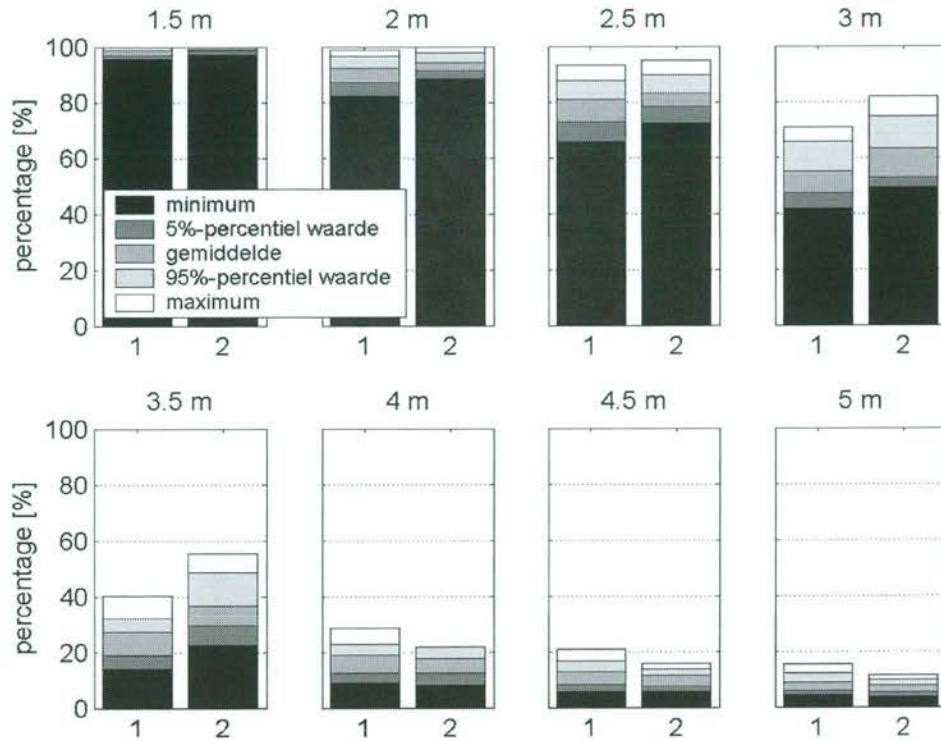
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





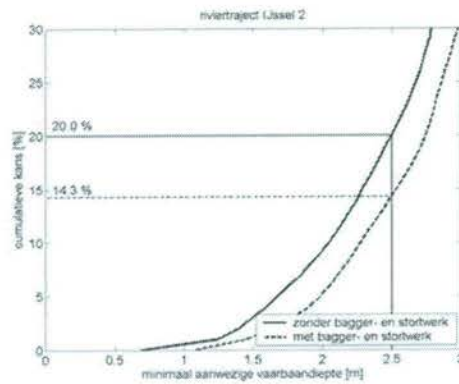
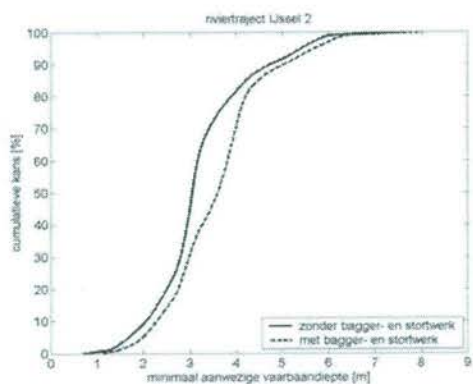
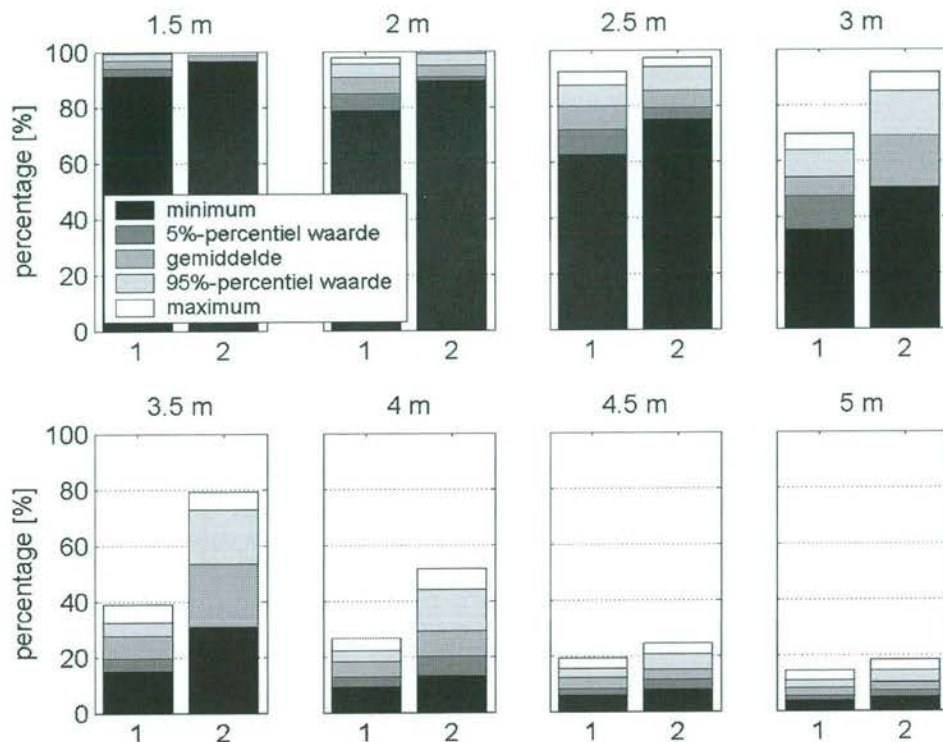
### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



## Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 2

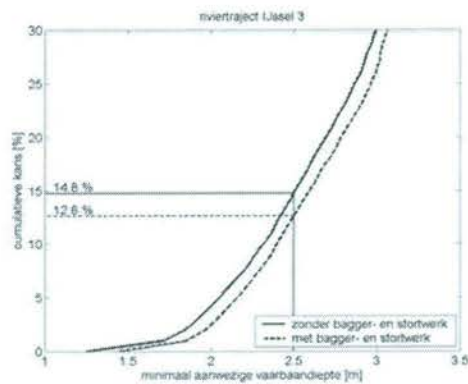
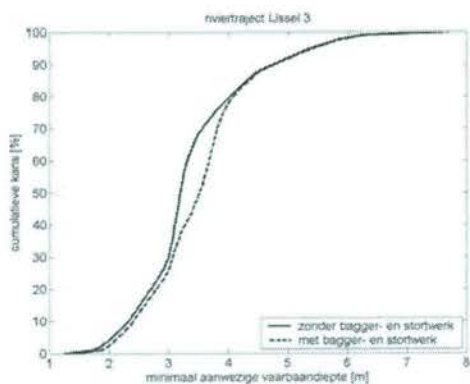
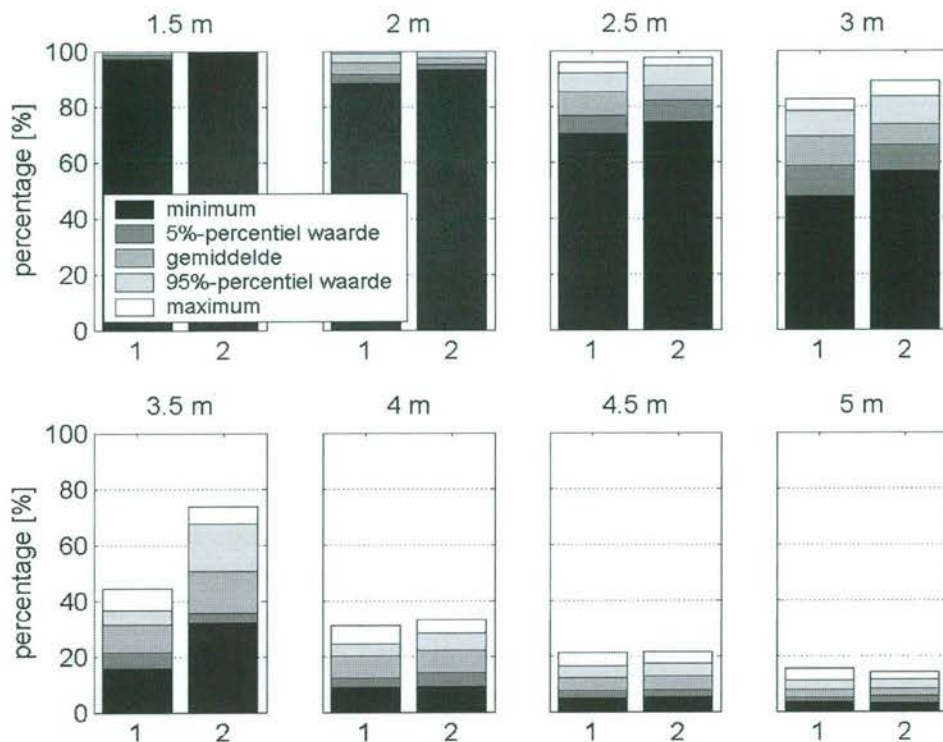
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





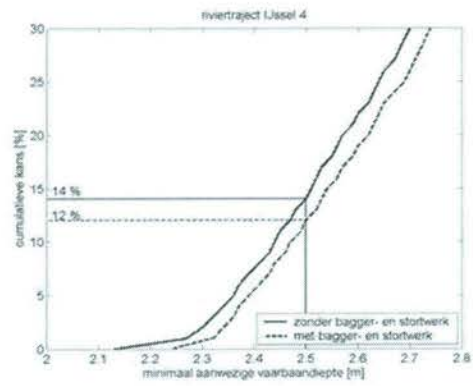
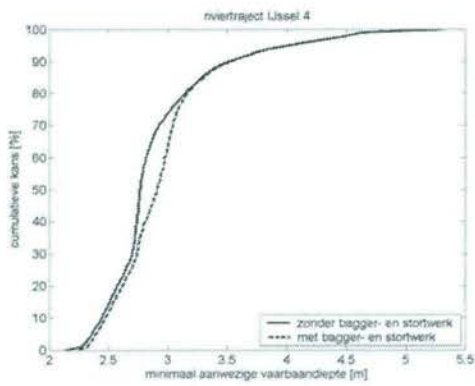
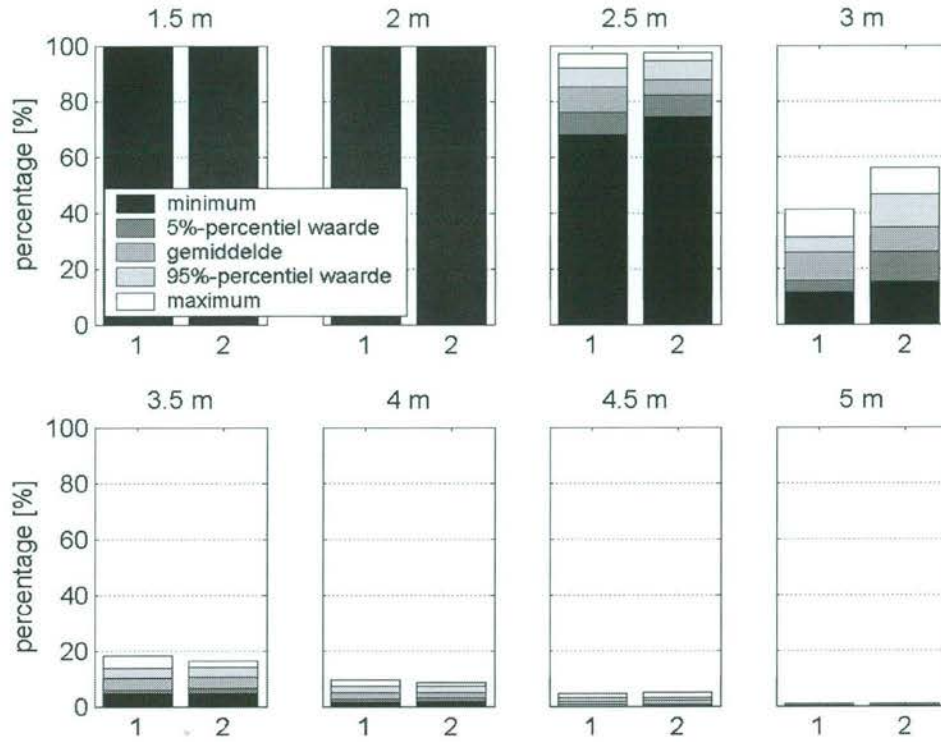
### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in uitgangssituatie met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 4

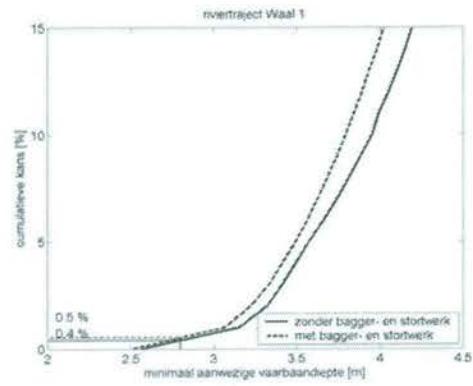
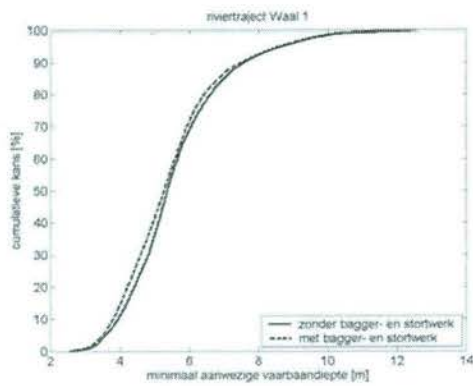
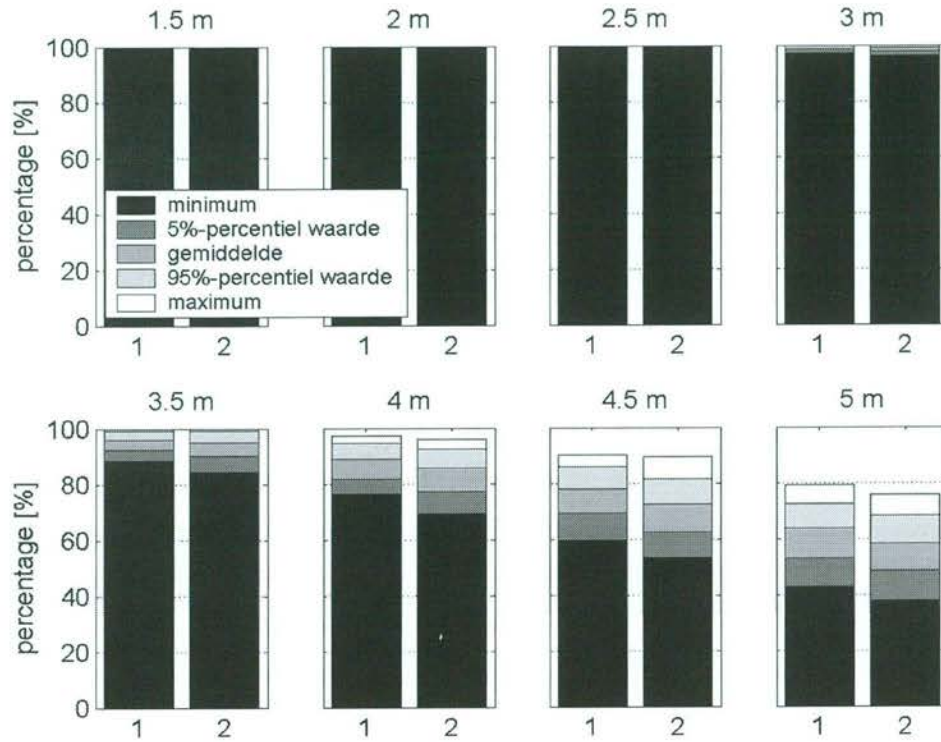
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





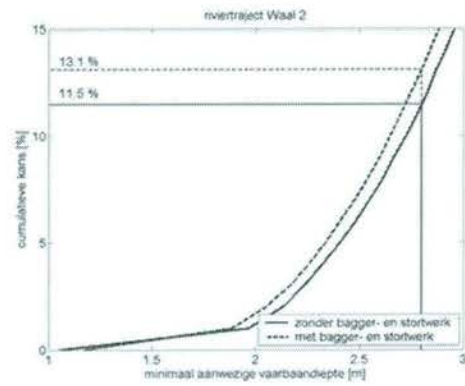
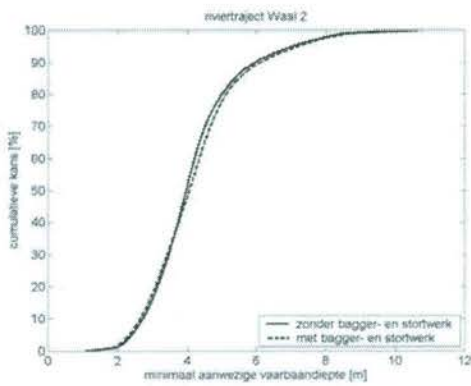
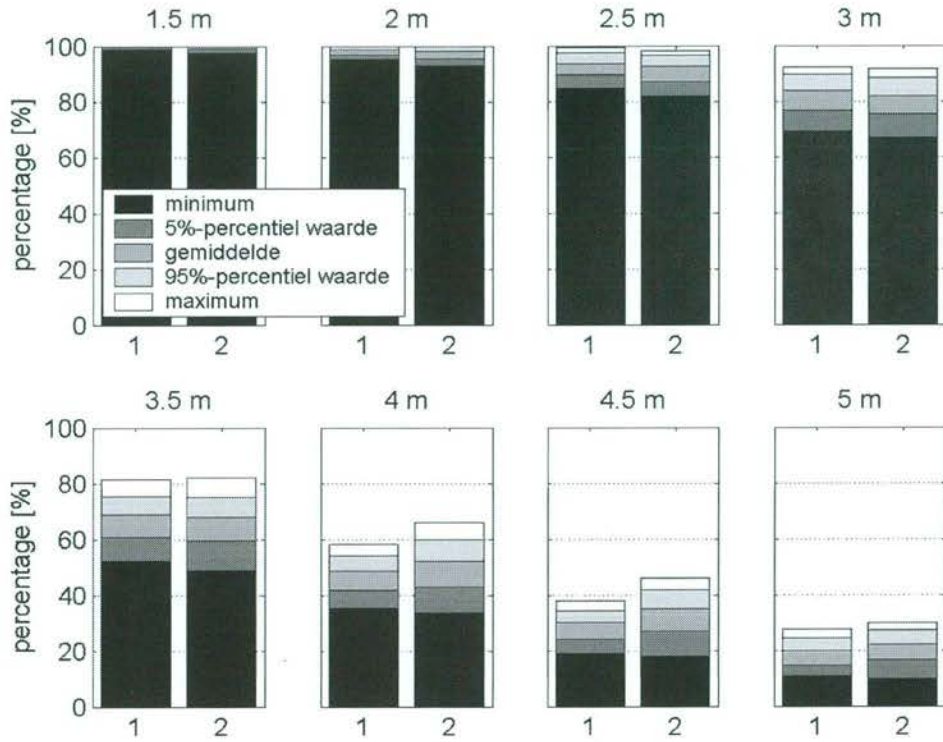
### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 2

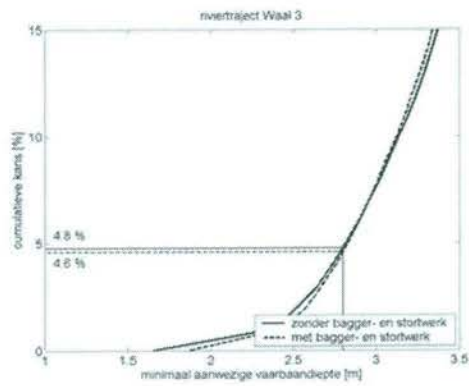
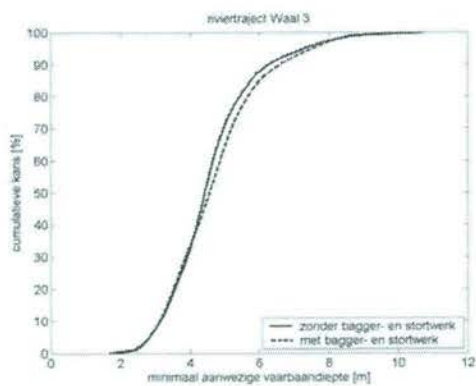
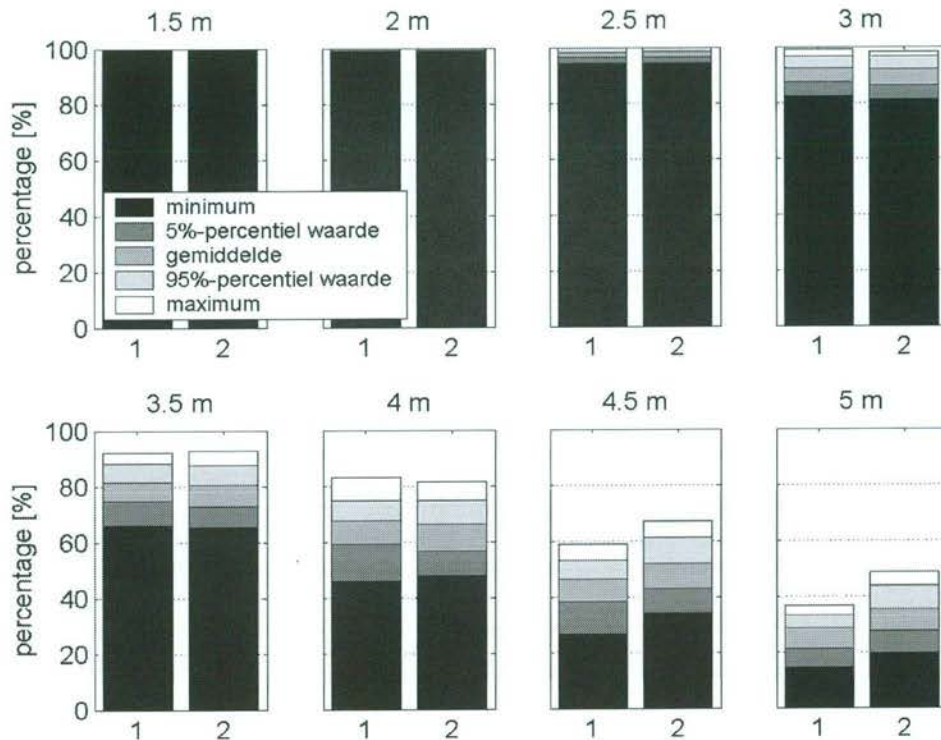
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





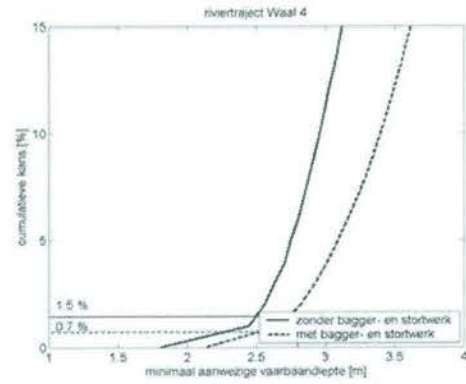
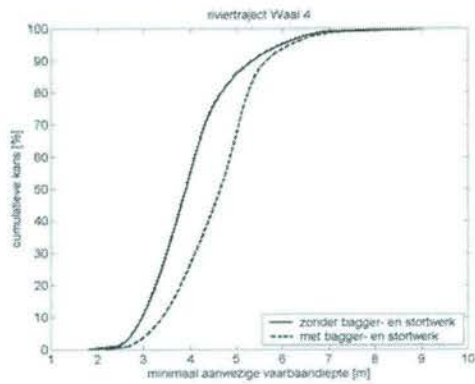
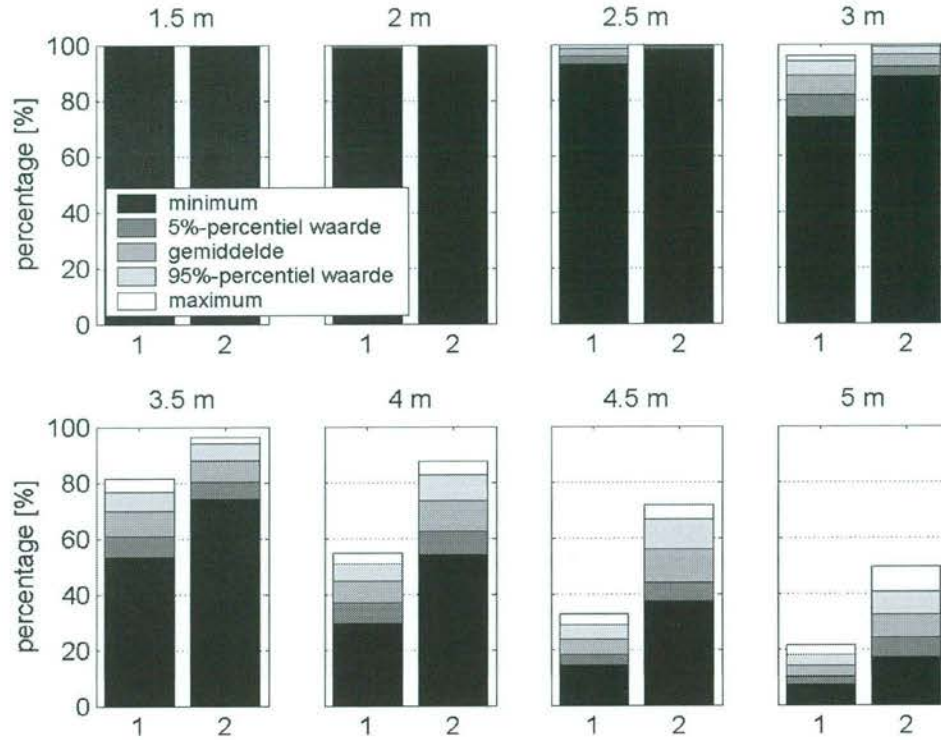
### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 4

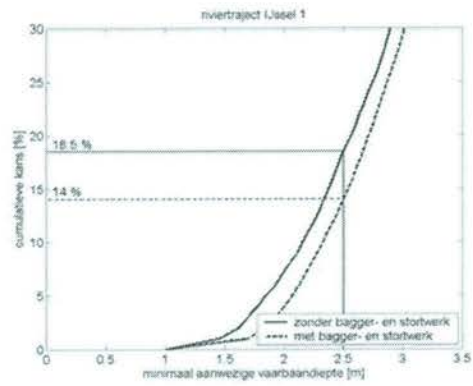
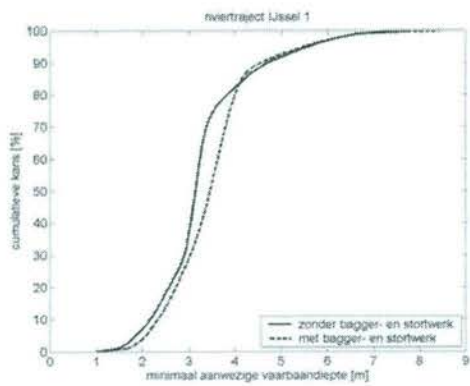
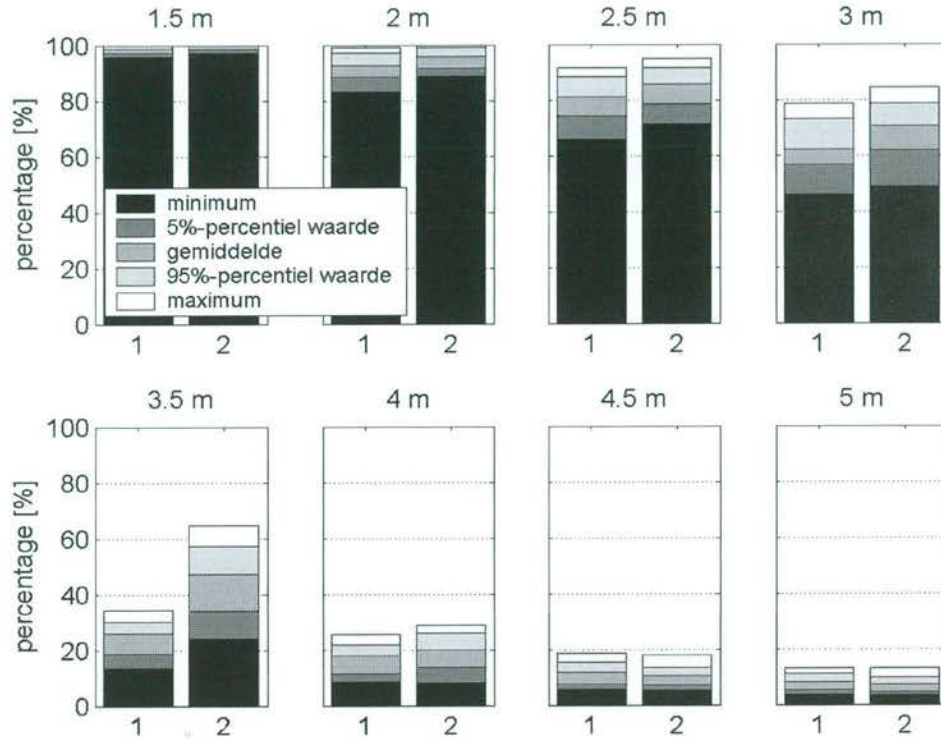
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





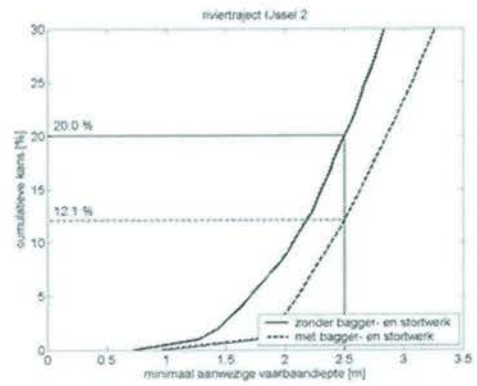
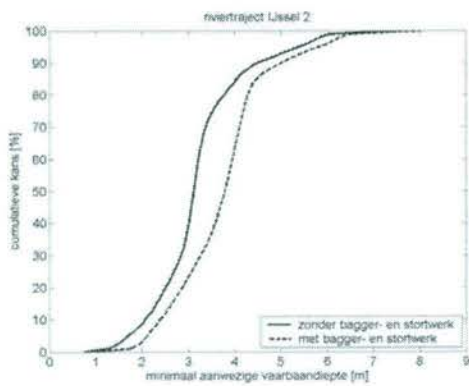
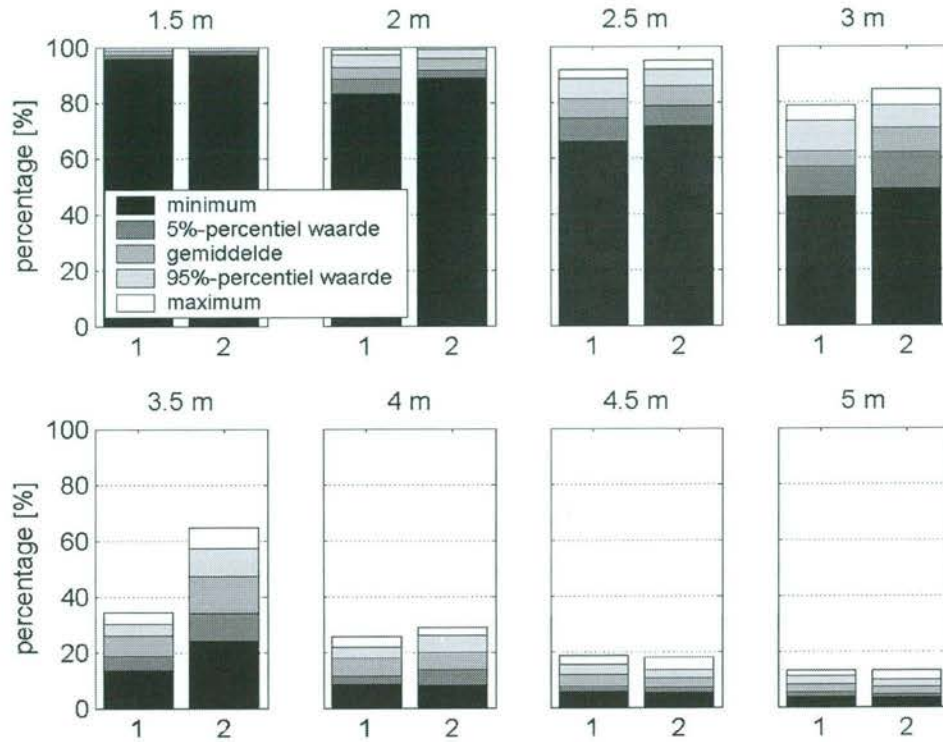
## Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 2

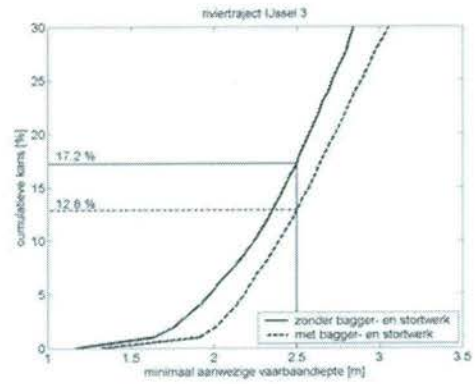
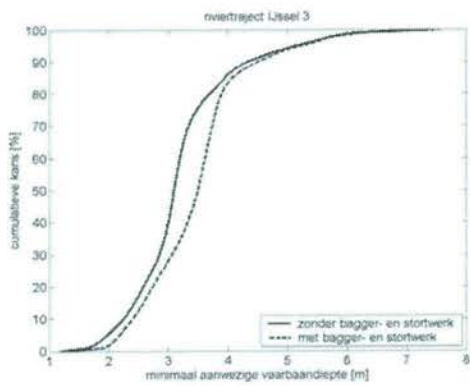
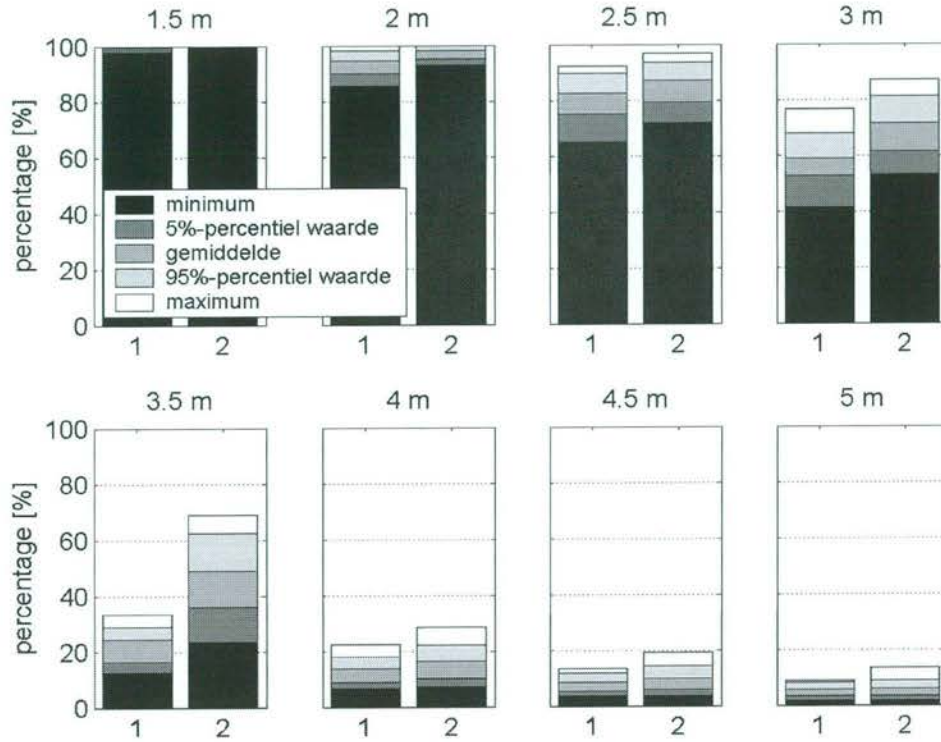
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





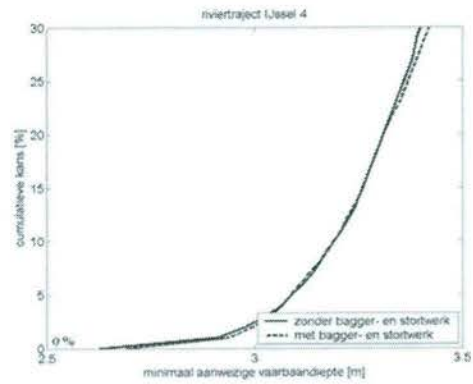
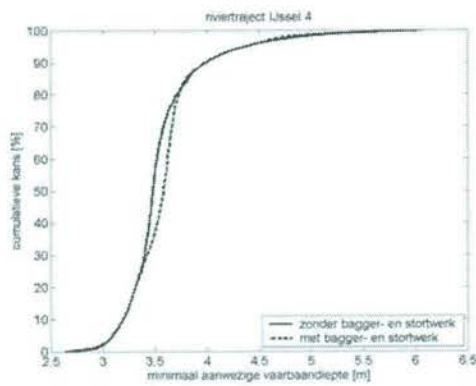
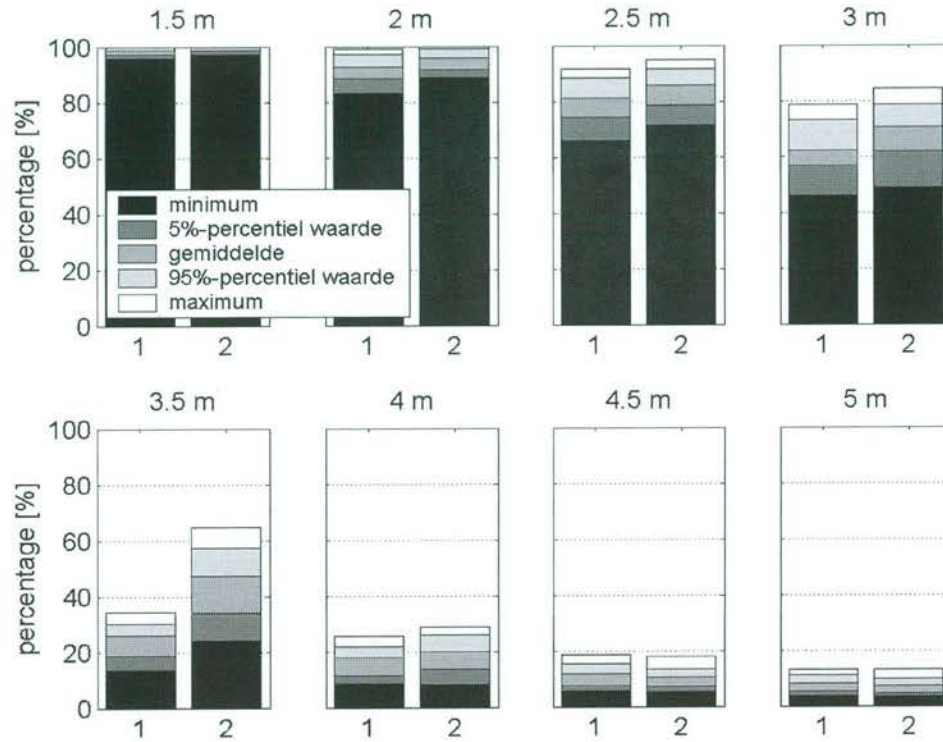
### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in ruimtelijk alternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 4

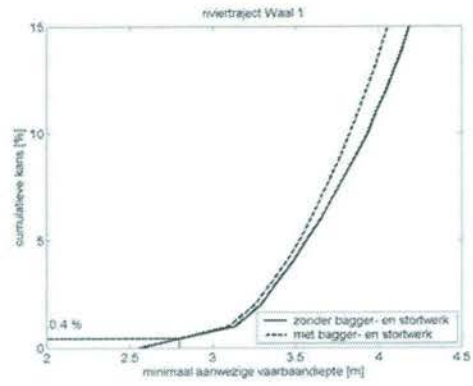
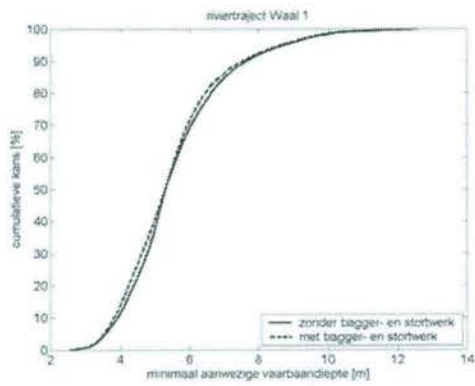
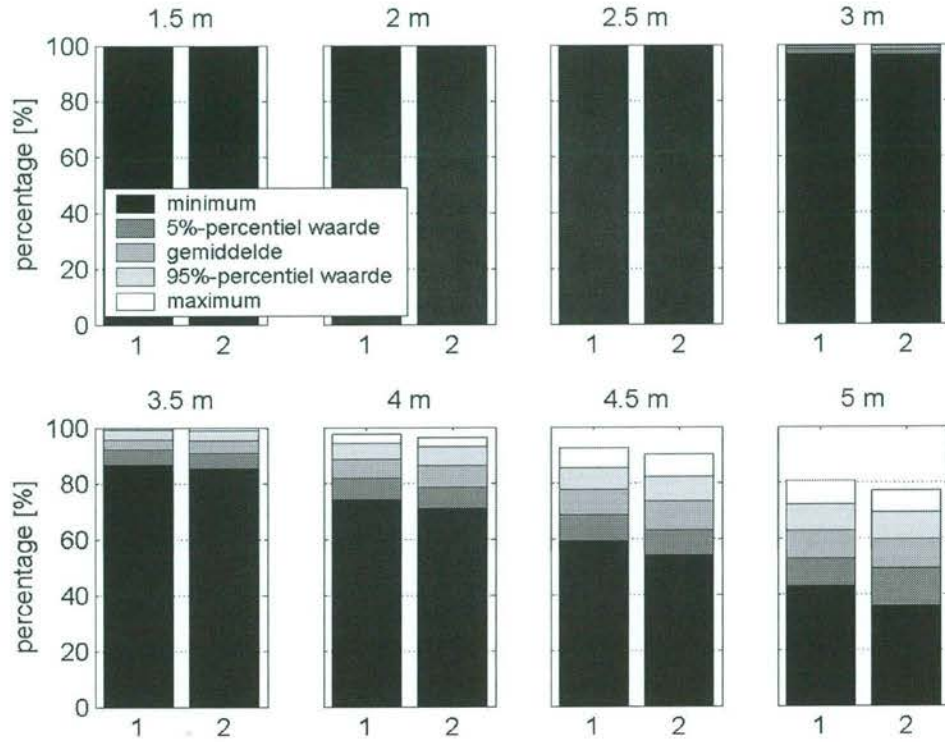
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





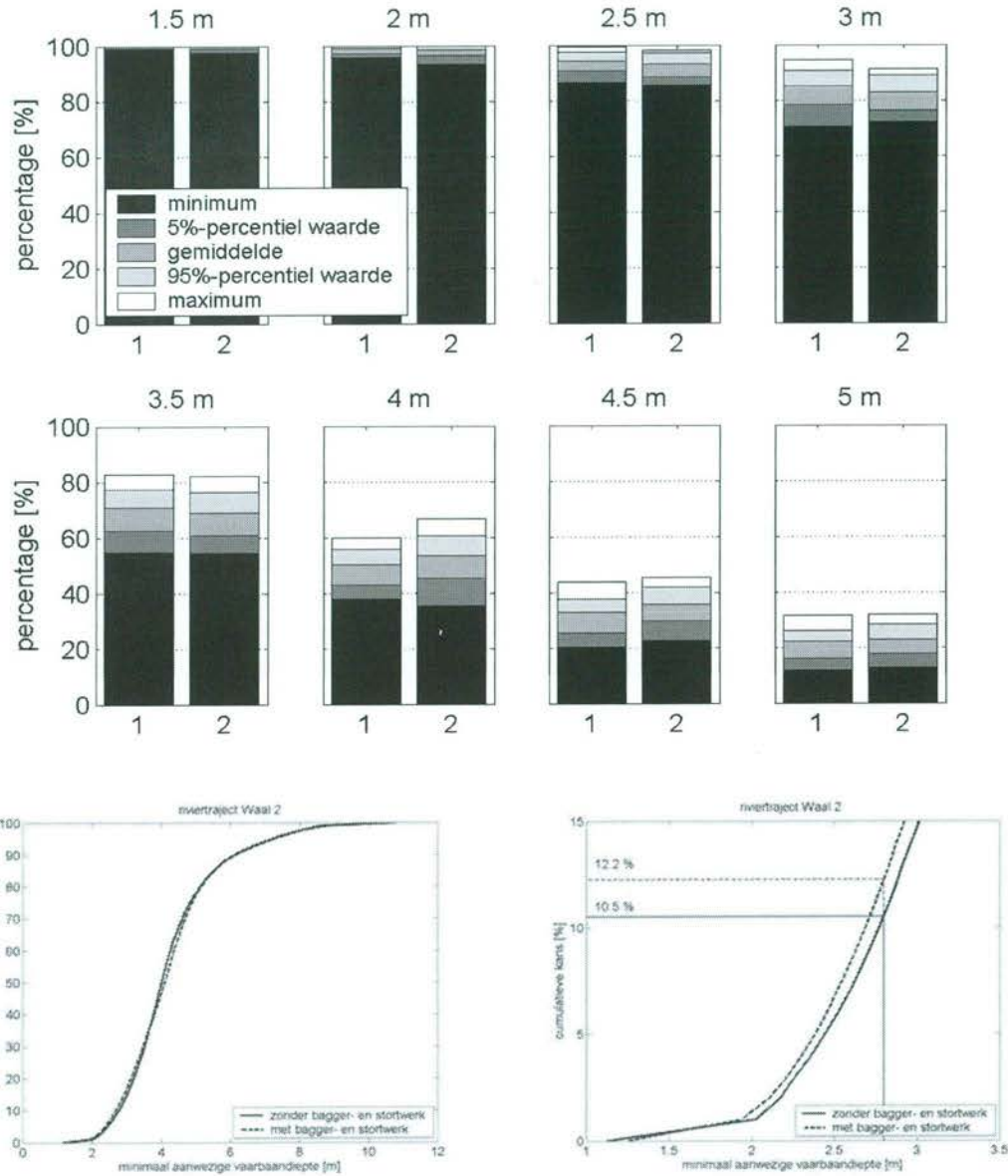
### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



## Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 2

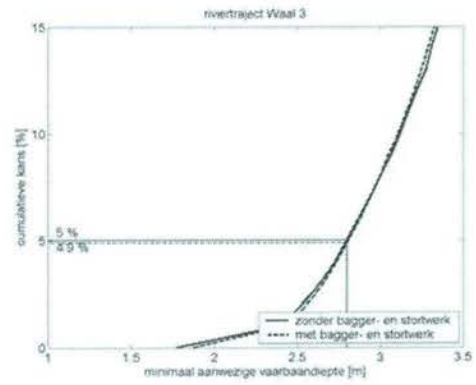
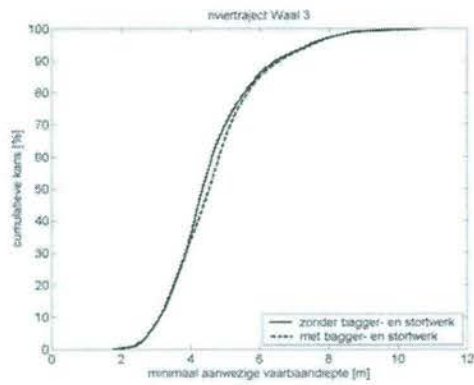
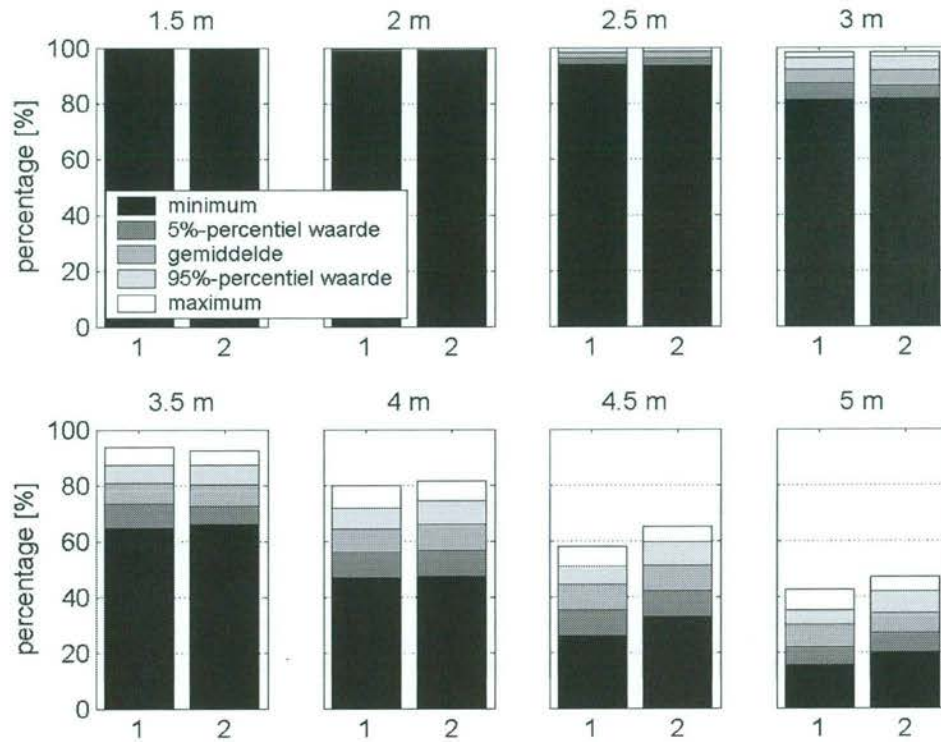
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





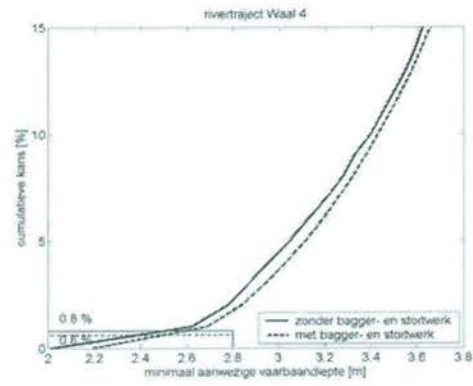
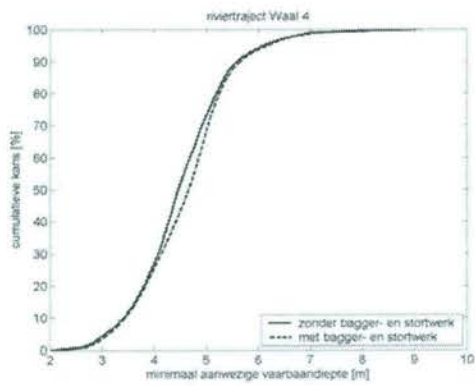
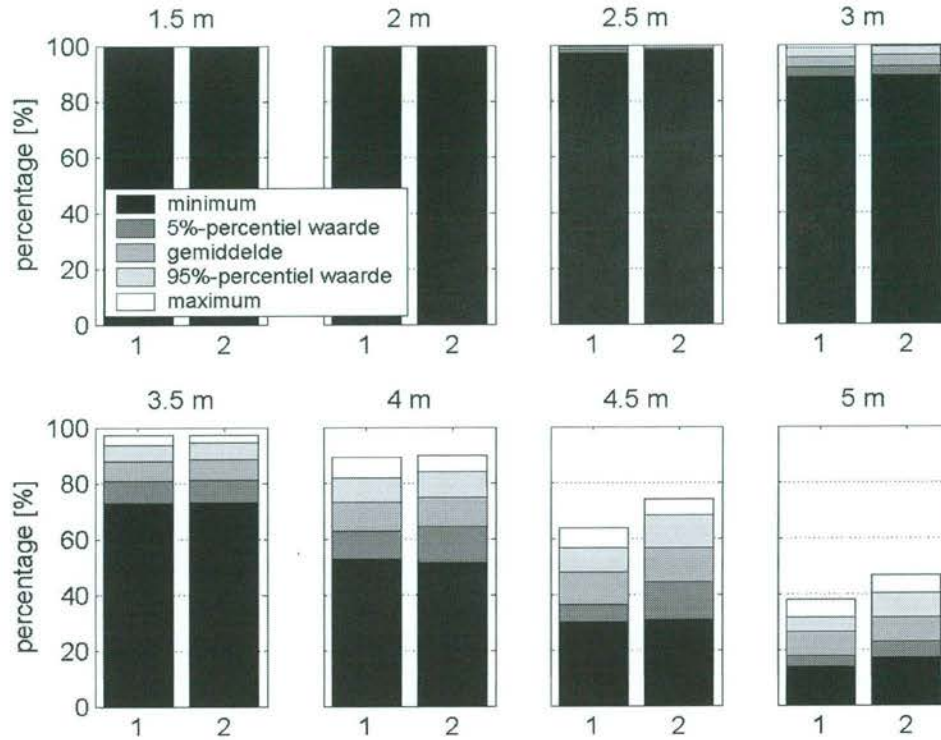
### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - Waal 4

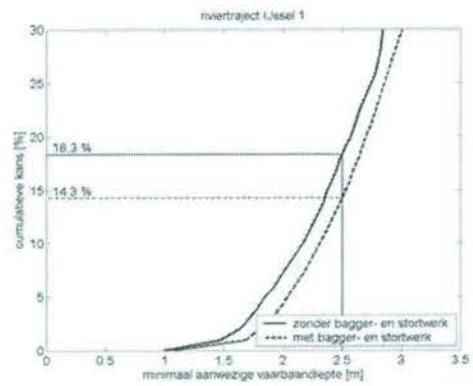
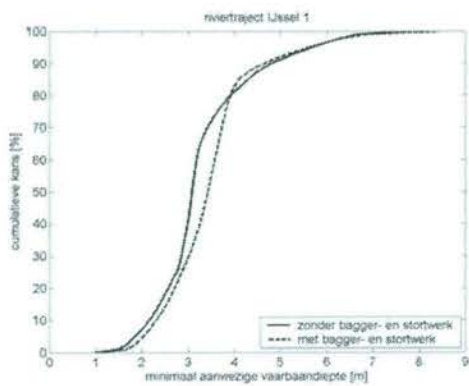
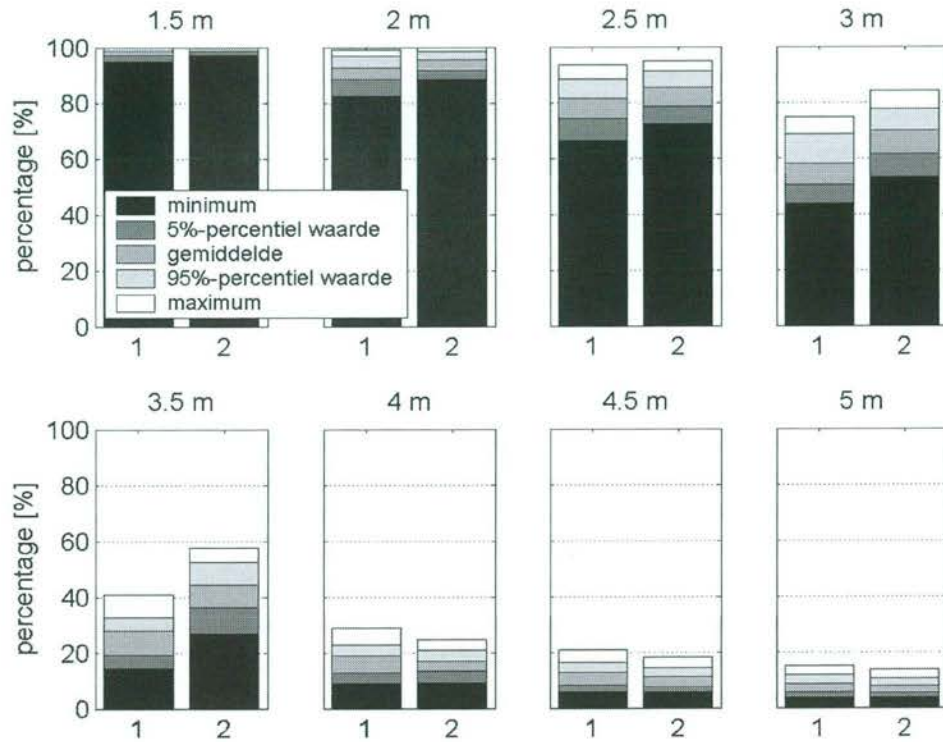
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





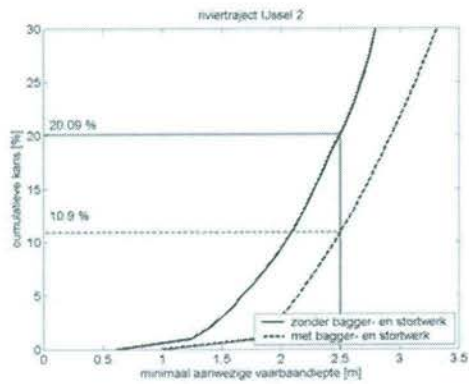
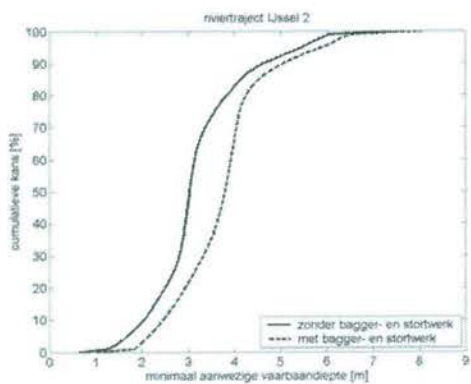
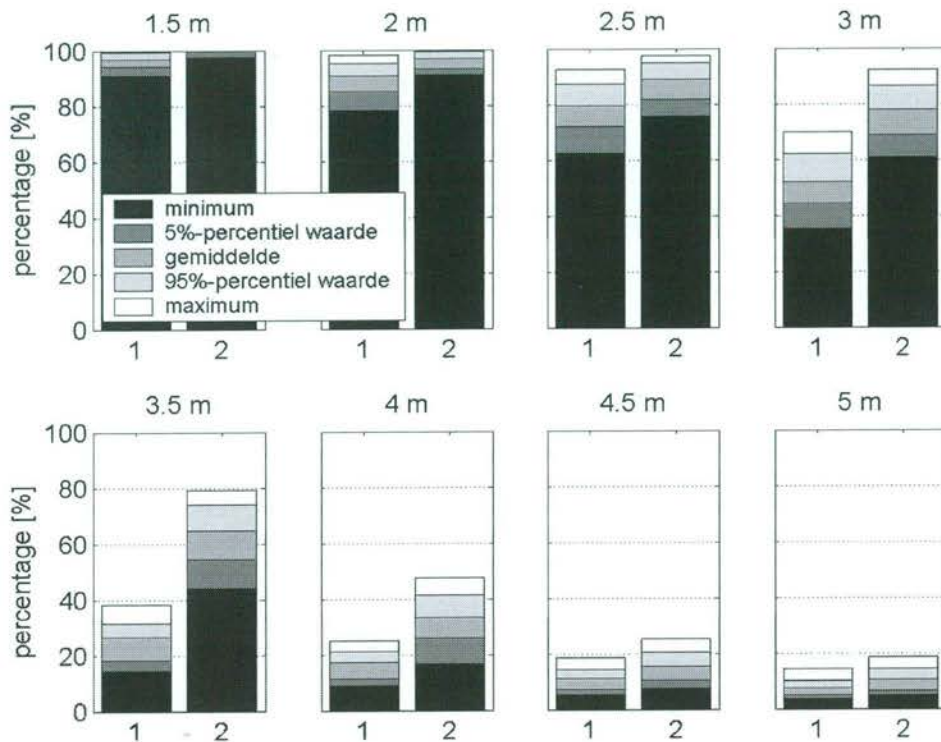
### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 1

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 2

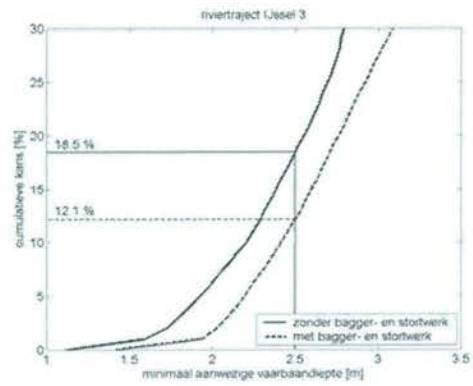
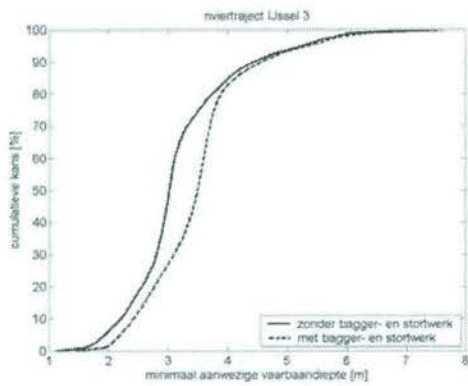
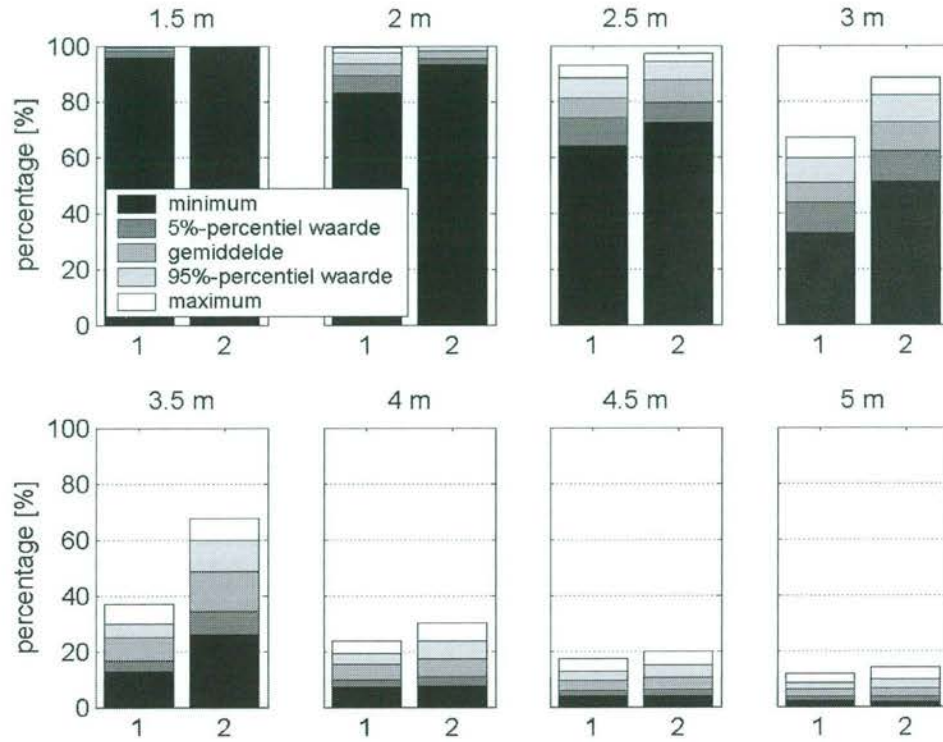
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk





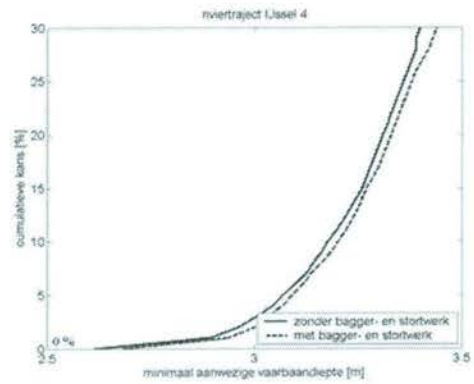
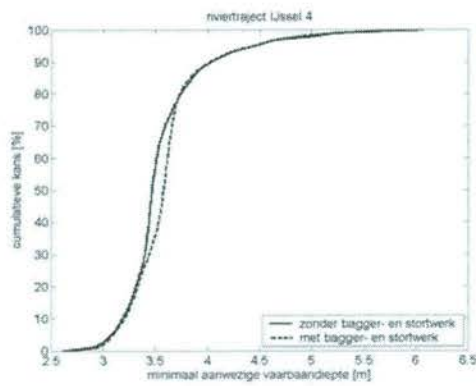
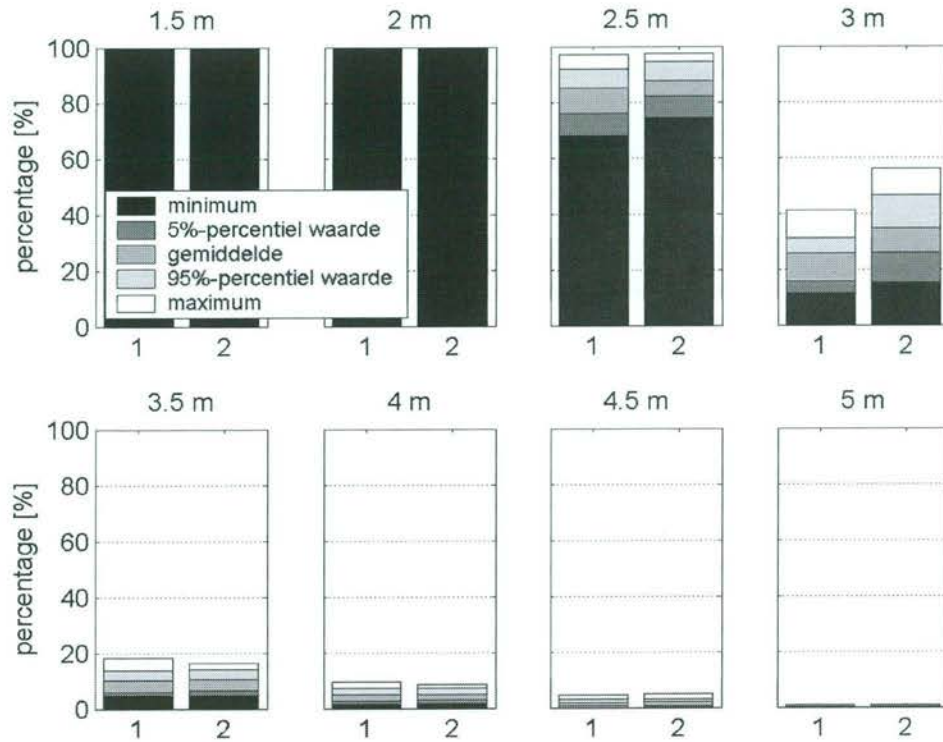
### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 3

(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk

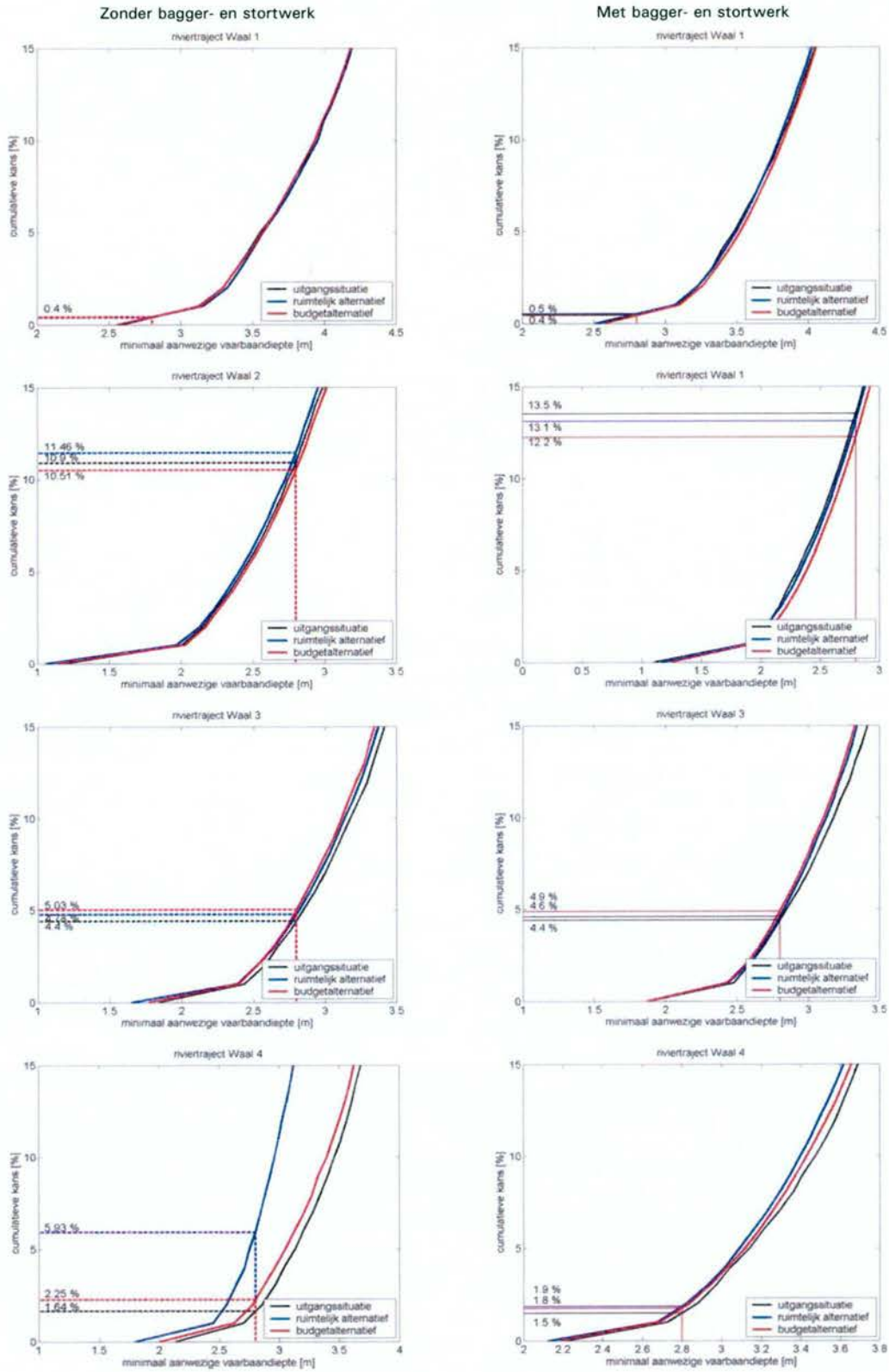


### Bevaarbaarheid in budgetalternatief met en zonder bagger en stortwerk - IJssel 4

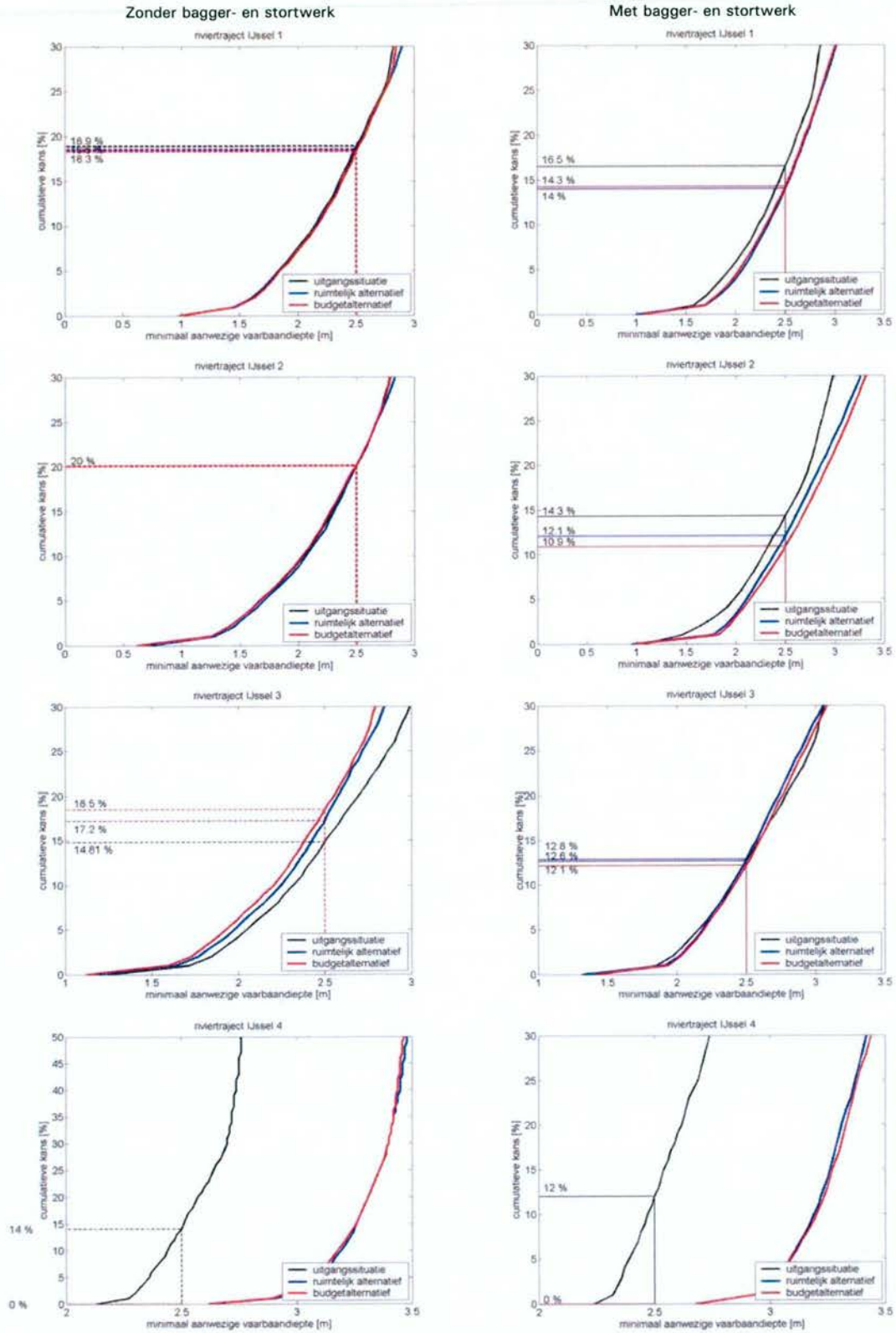
(1) uitgangssituatie zonder onderhoudsbagger- en stortwerk; (2) uitgangssituatie met onderhoudsbagger- en stortwerk



**Bevaarbaarheid in de uitgangssituatie, het budgetalternatief en het ruimtelijke alternatief zonder en met bagger- en stortwerk**



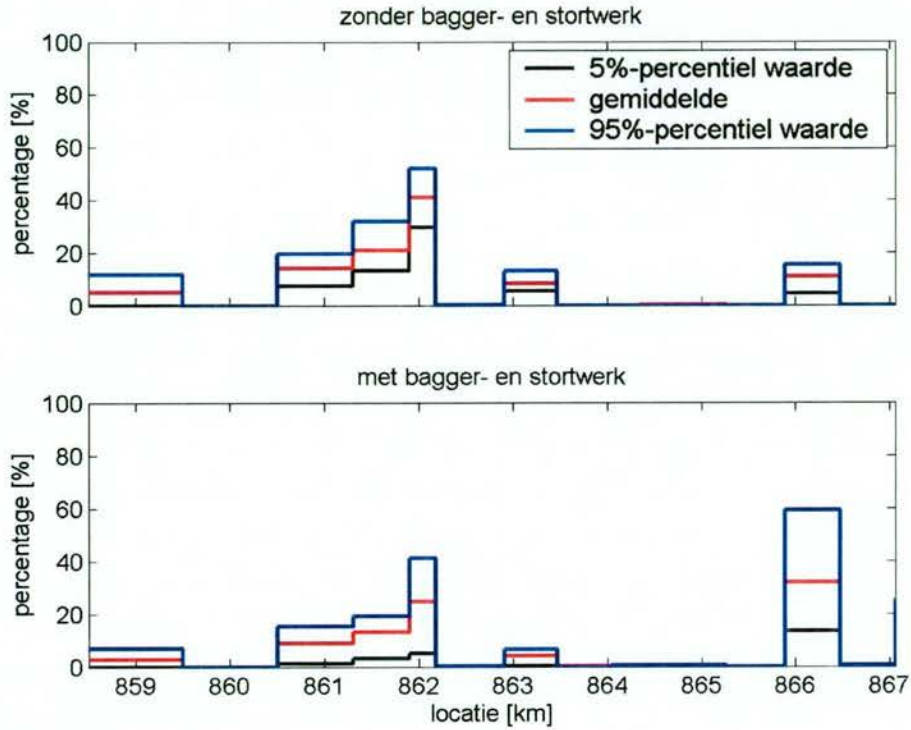




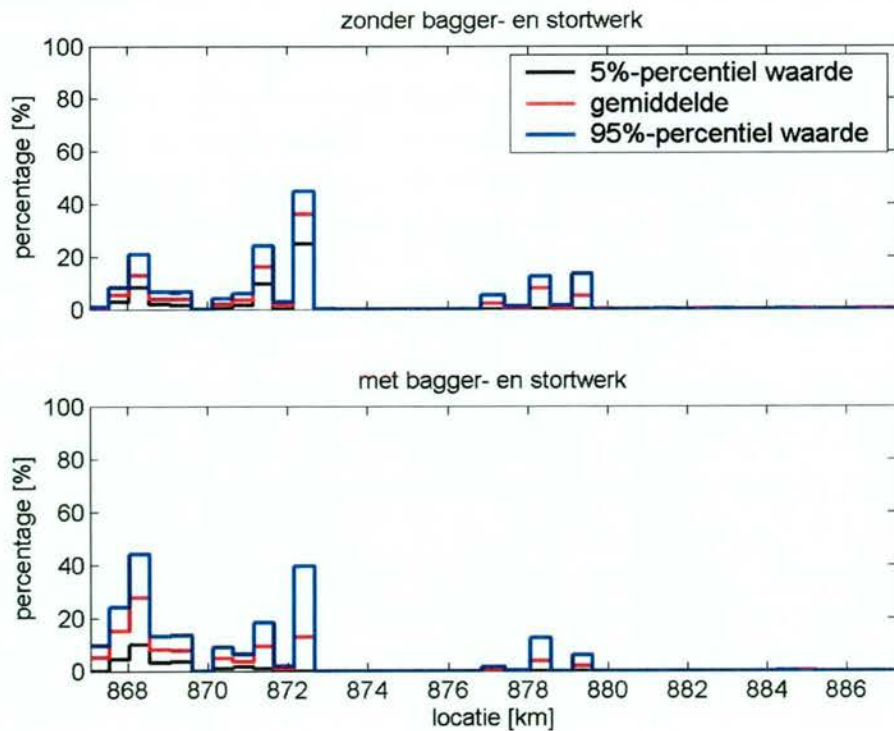
### Locaties maatgevende waterdiepte op Bovenrijn en Waal

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie *x* bevindt in de uitgangssituatie zonder en met bagger- en stortwerk.

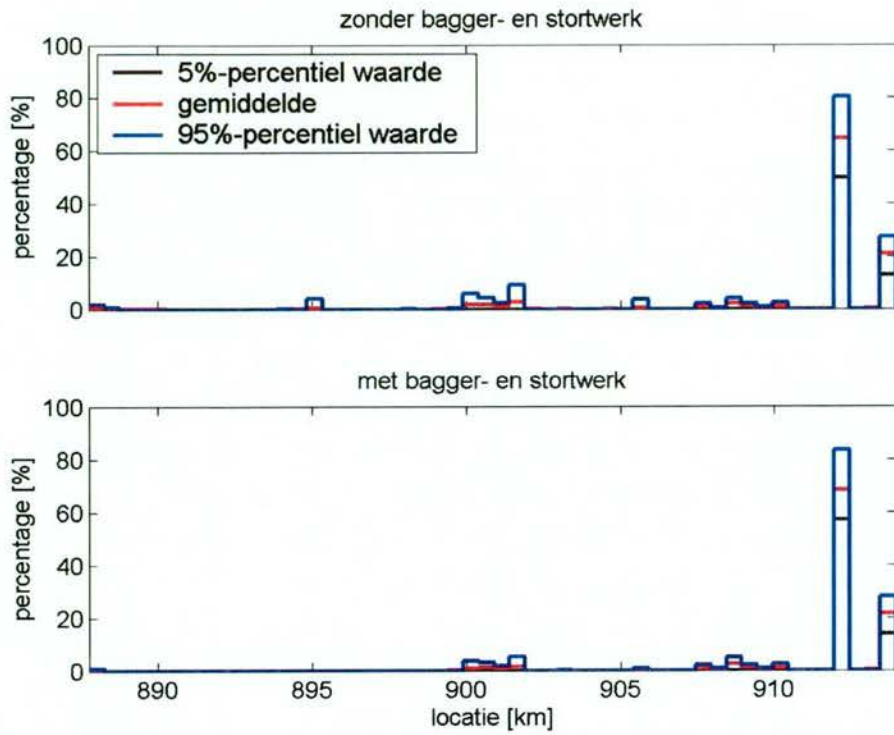
a. Riviertraject Waal 1



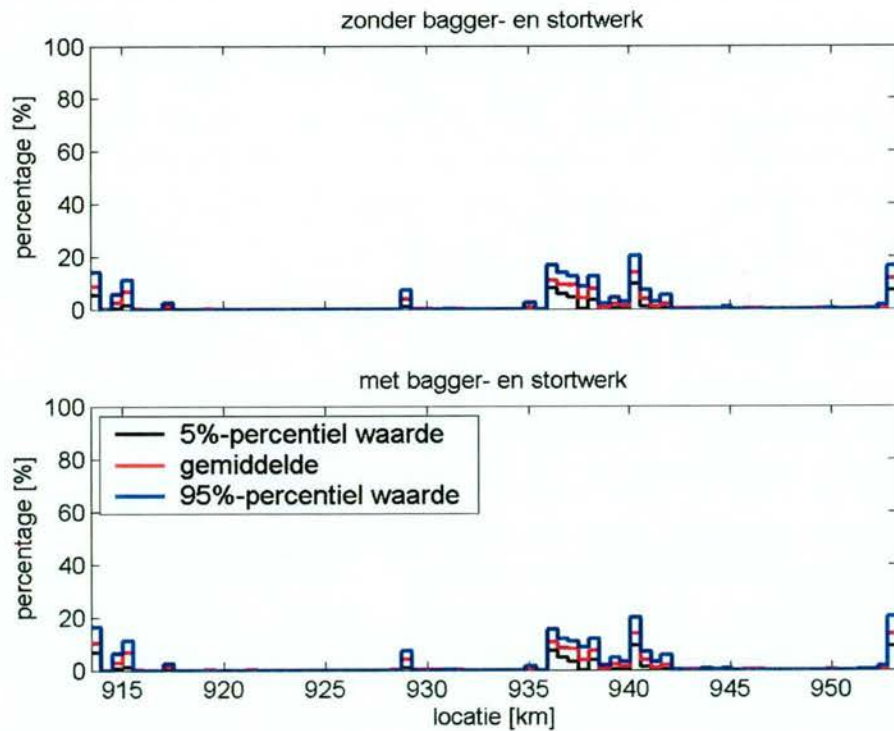
b. Riviertraject Waal 2



c. Riviertraject Waal 3



d. Riviertraject Waal 4

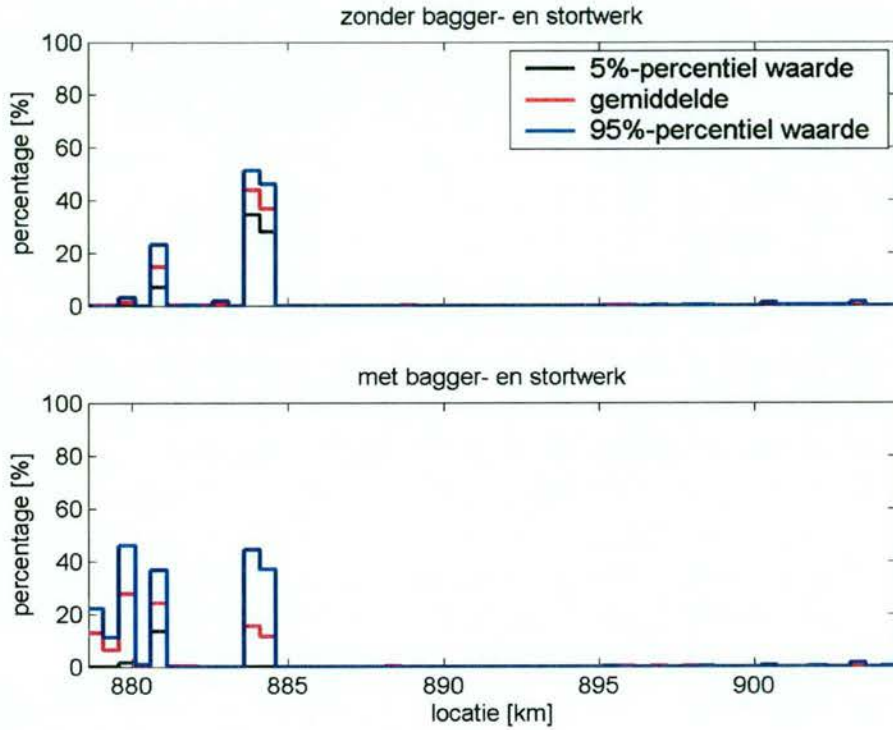




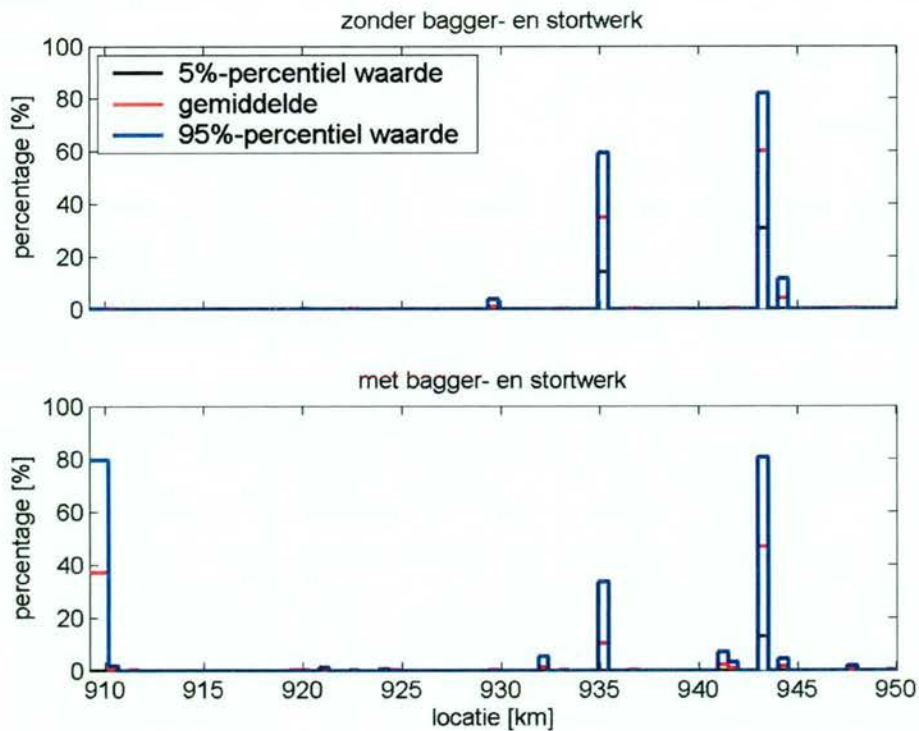
### Locaties maatgevende waterdiepte op IJssel

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt in de uitgangssituatie zonder en met bagger- en stortwerk.

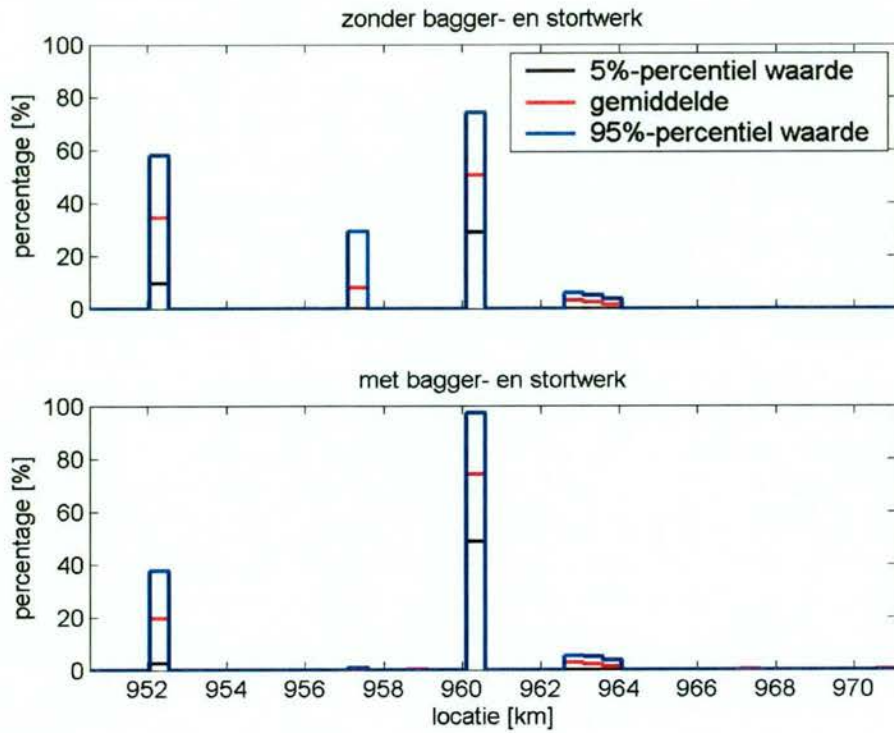
a. Riviertraject IJssel 1



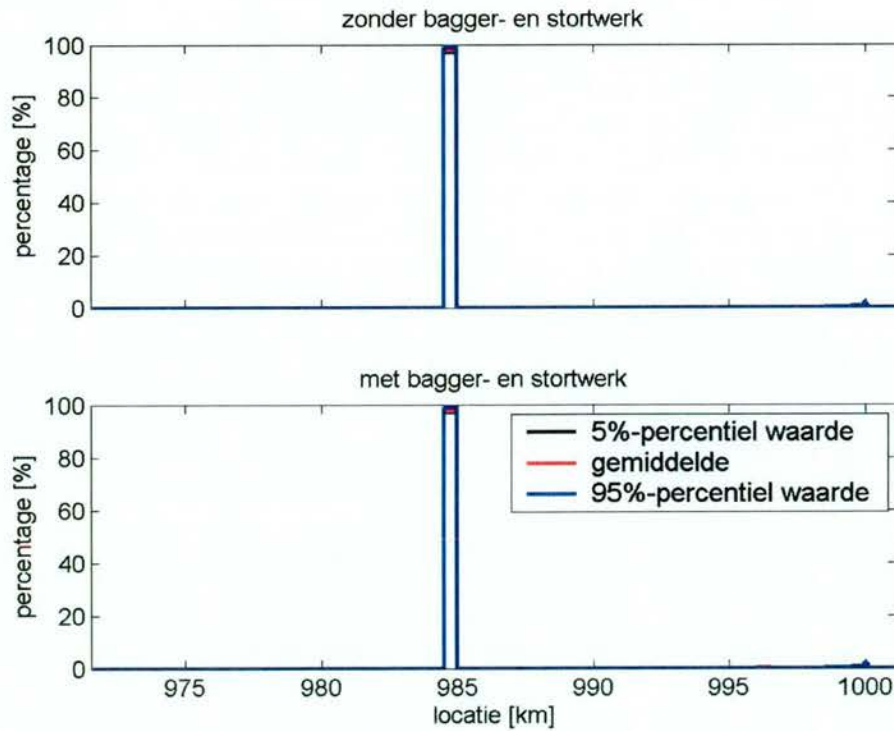
b. Riviertraject IJssel 2



c. Riviertraject IJssel 3



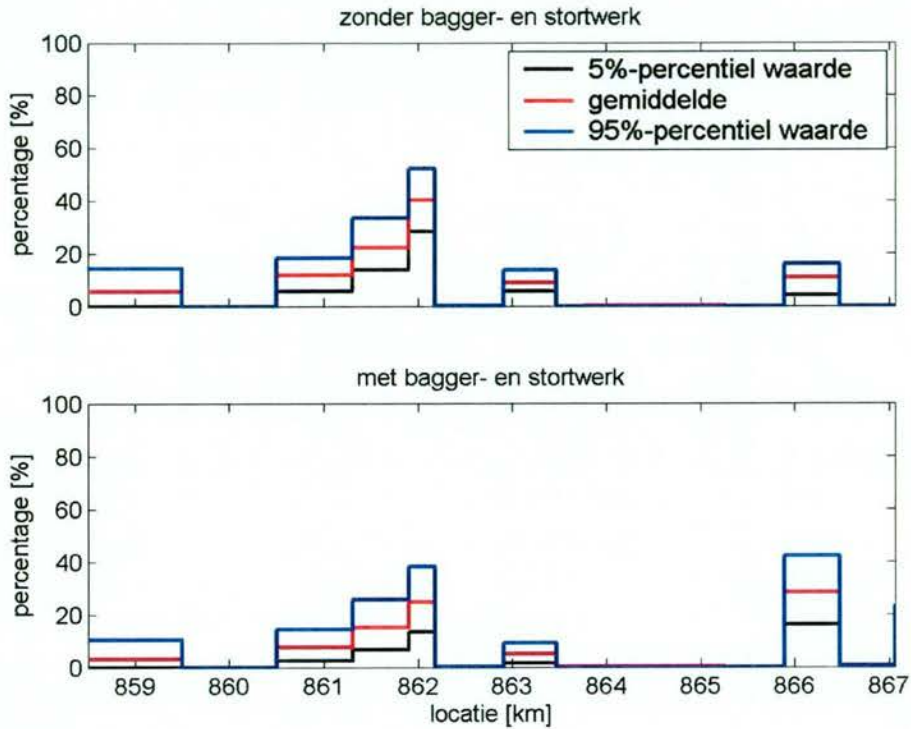
d. Riviertraject IJssel 4



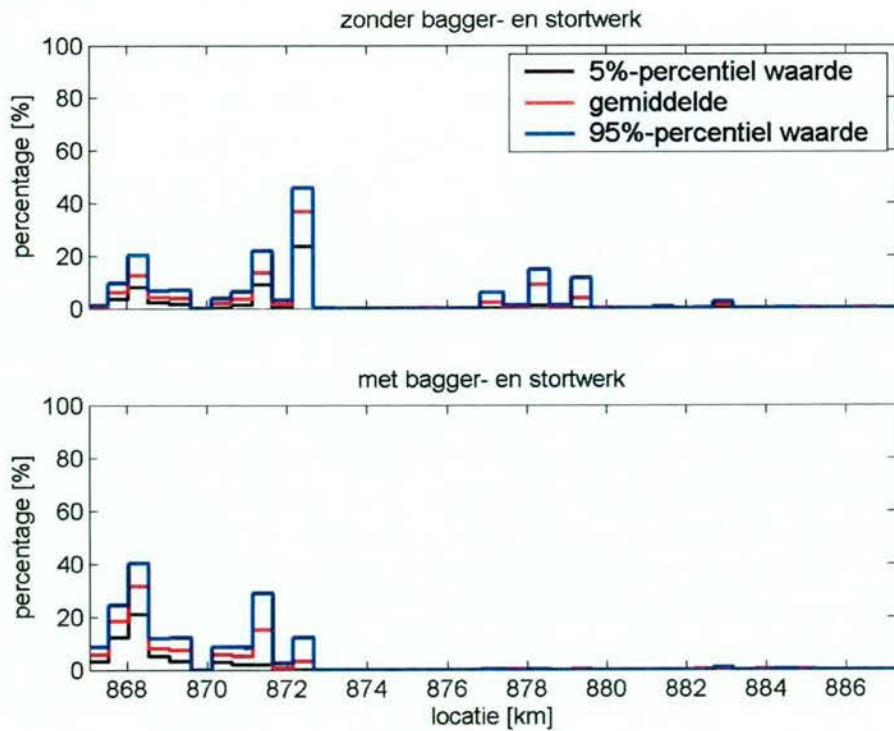
### Locaties maatgevende waterdiepte op Bovenrijn en Waal

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt voor het budgetalternatief zonder en met bagger- en stortwerk.

a. Riviertraject Waal 1

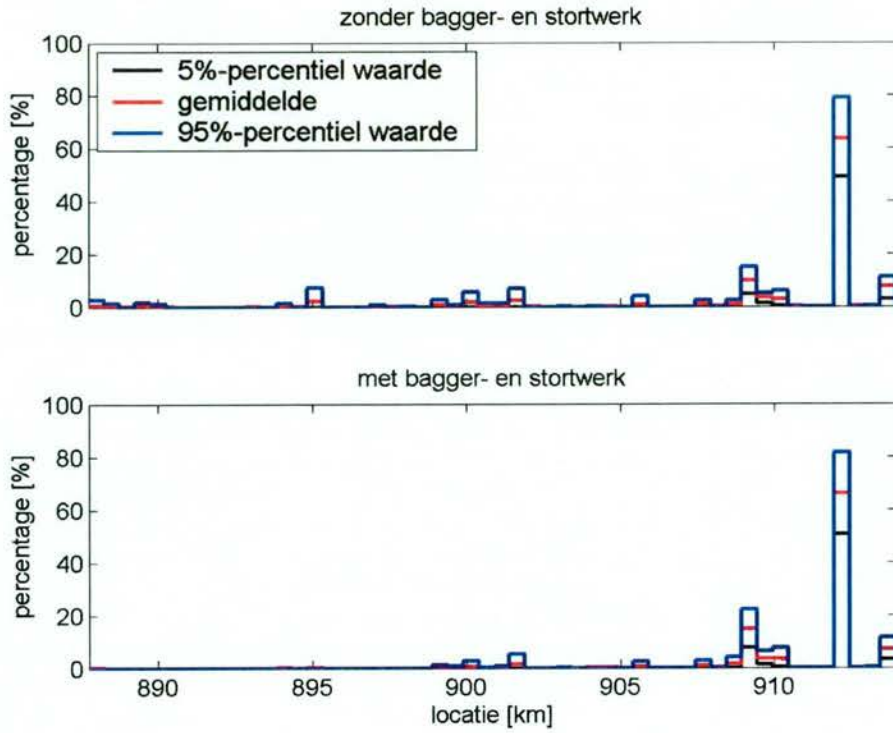


b. Riviertraject Waal 2

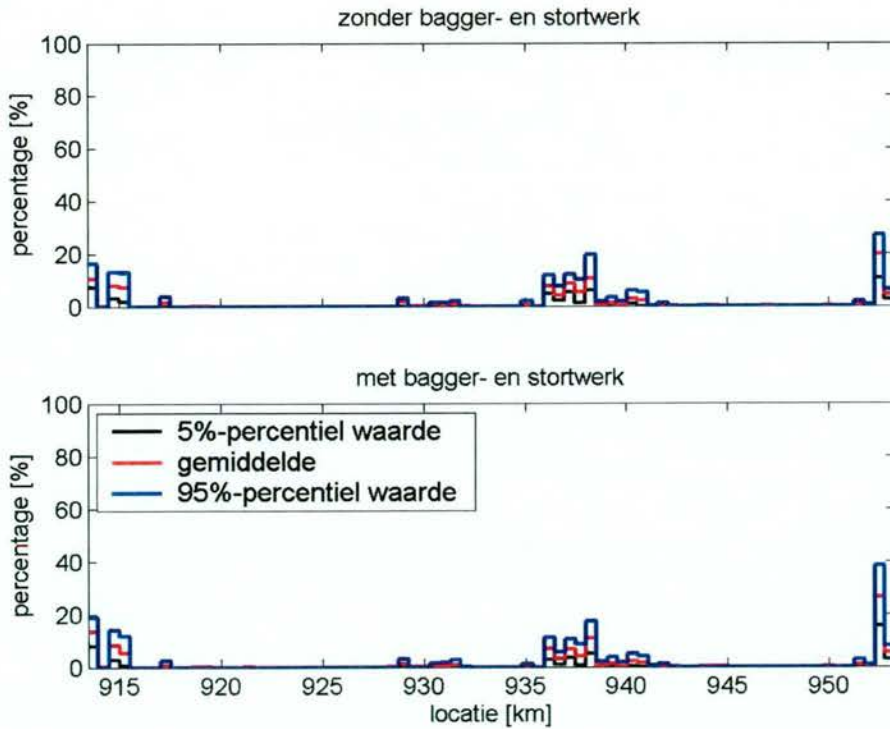




c. Riviertraject Waal 3



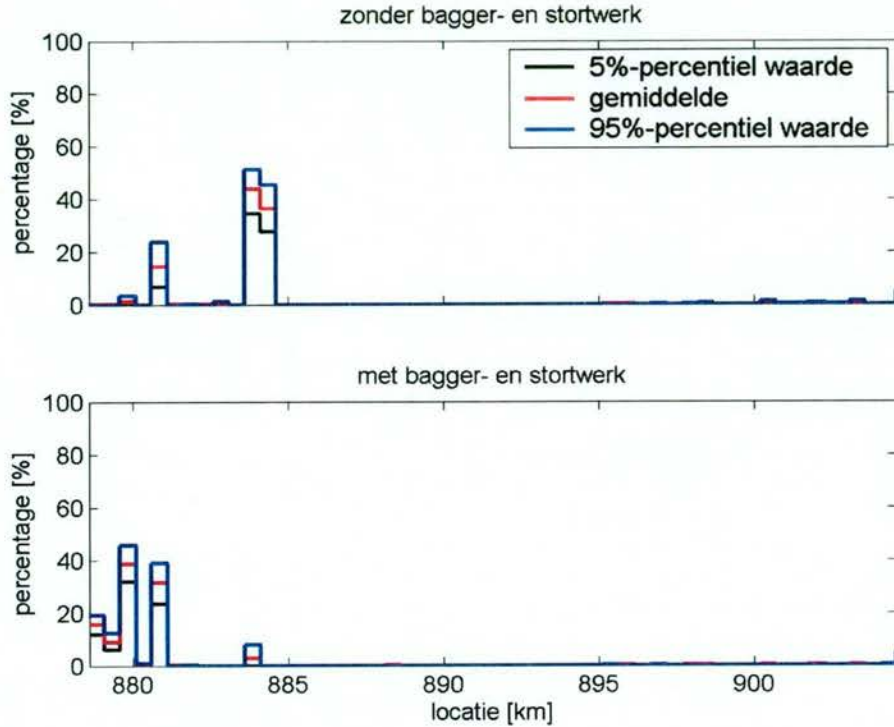
d. Riviertraject Waal 4



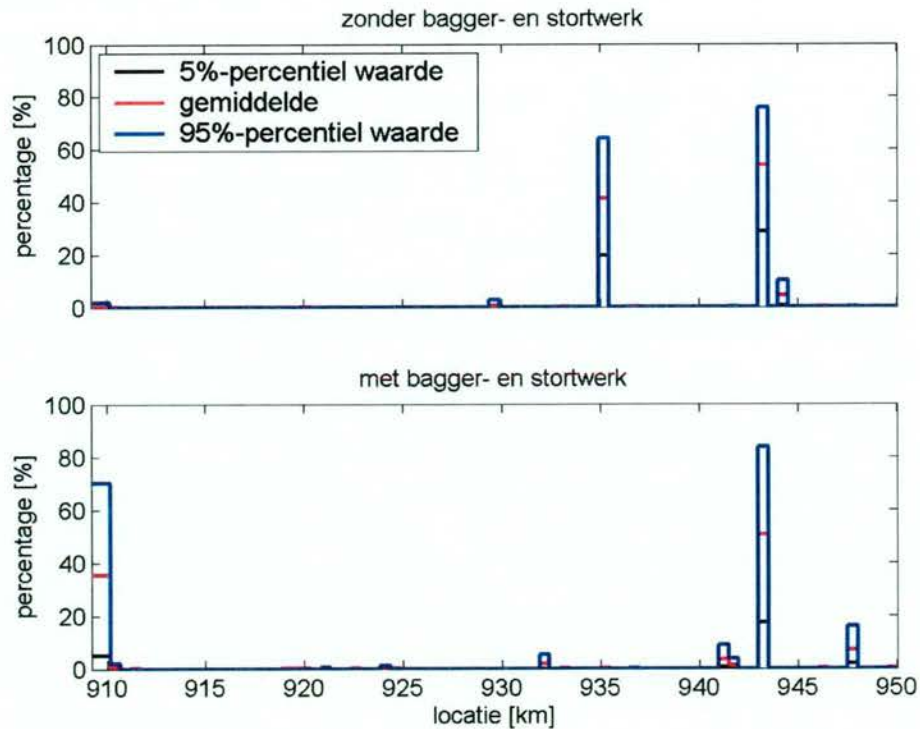
### Locaties maatgevende waterdiepte op IJssel

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt voor het budgetalternatief zonder en met bagger- en stortwerk.

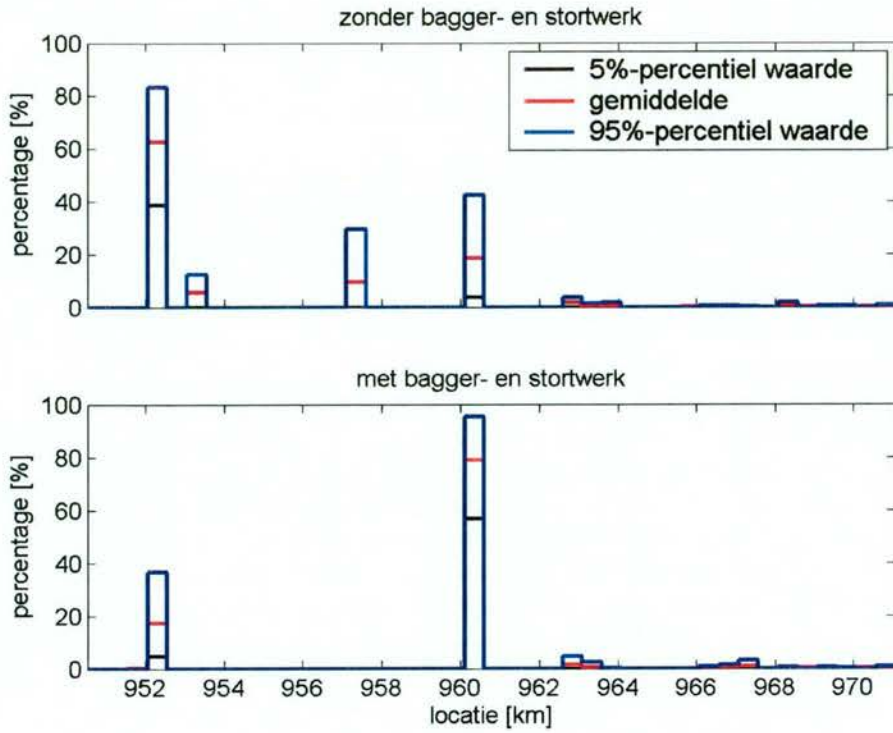
a. Riviertraject IJssel 1



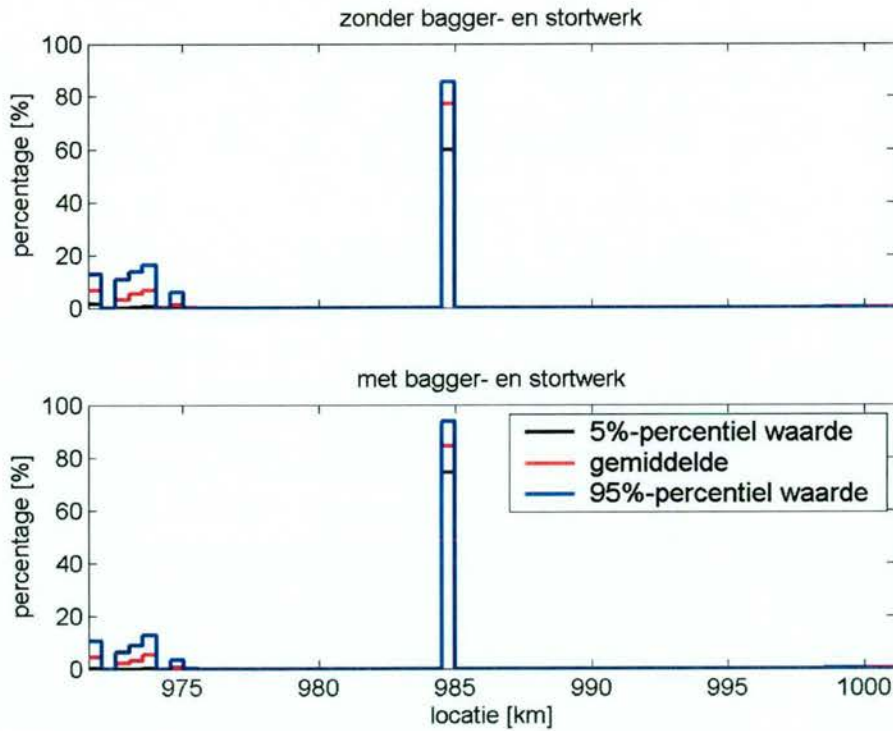
b. Riviertraject IJssel 2



c. Riviertraject IJssel 3



d. Riviertraject IJssel 4

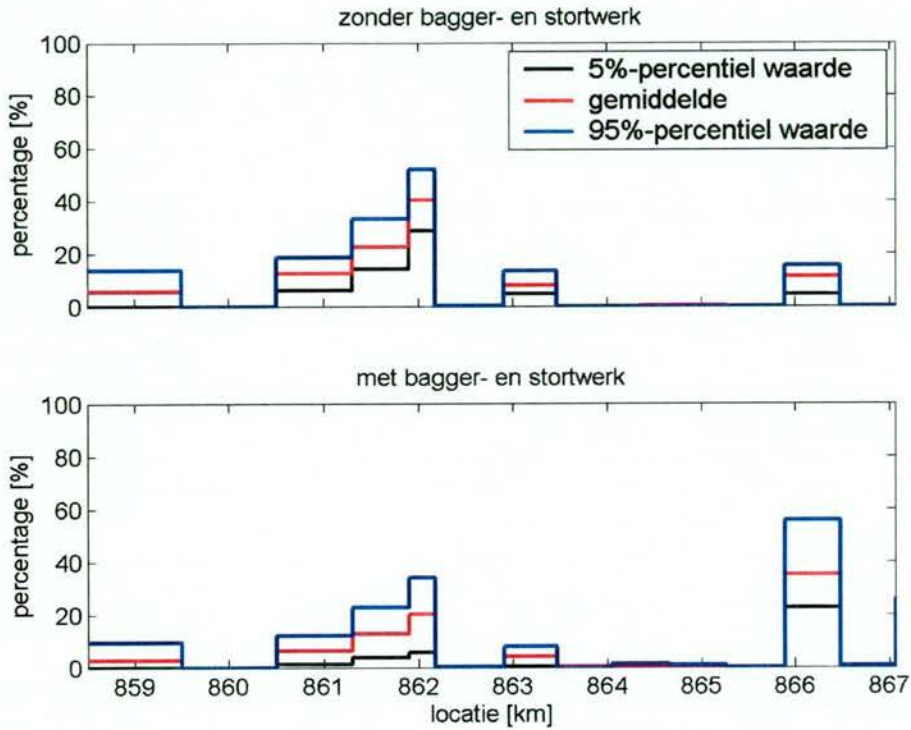




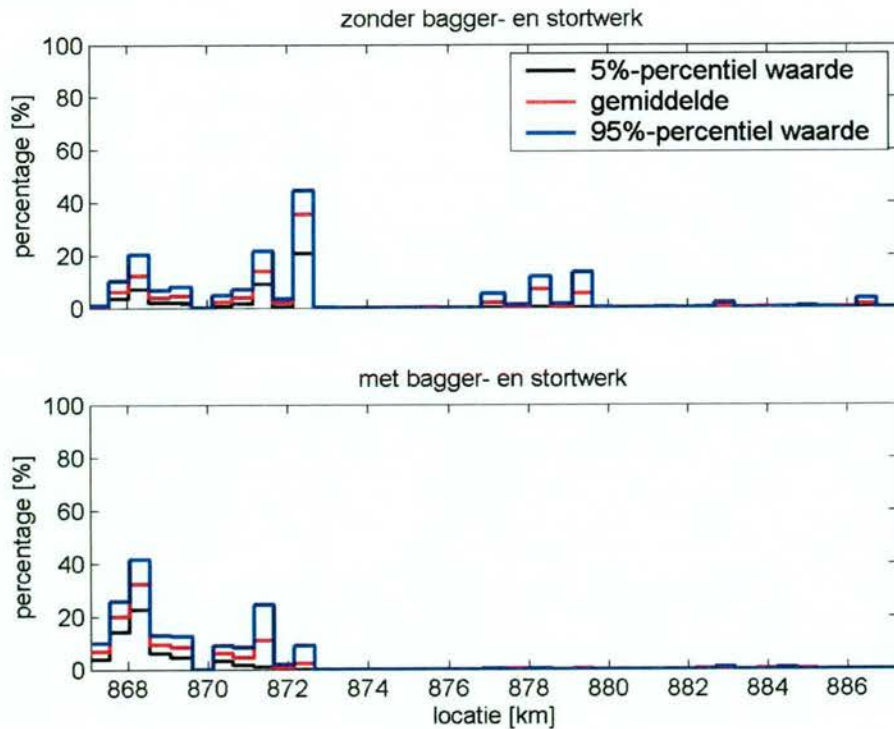
**Locaties maatgevende waterdiepte op Bovenrijn en Waal**

*de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie x bevindt voor het ruimtelijk alternatief zonder en met bagger- en stortwerk.*

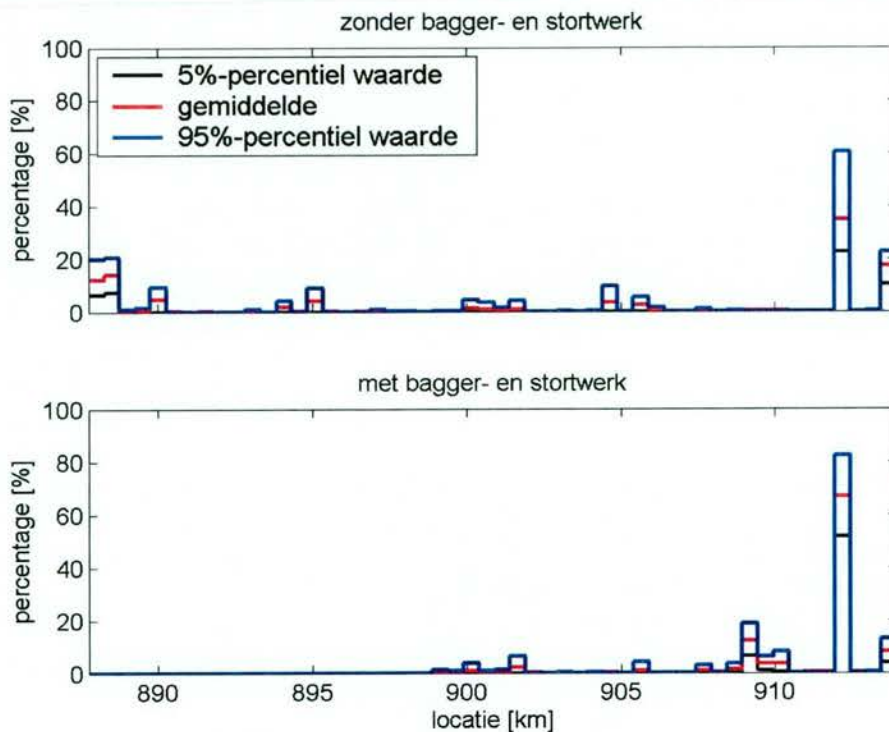
a. Riviertraject Waal 1



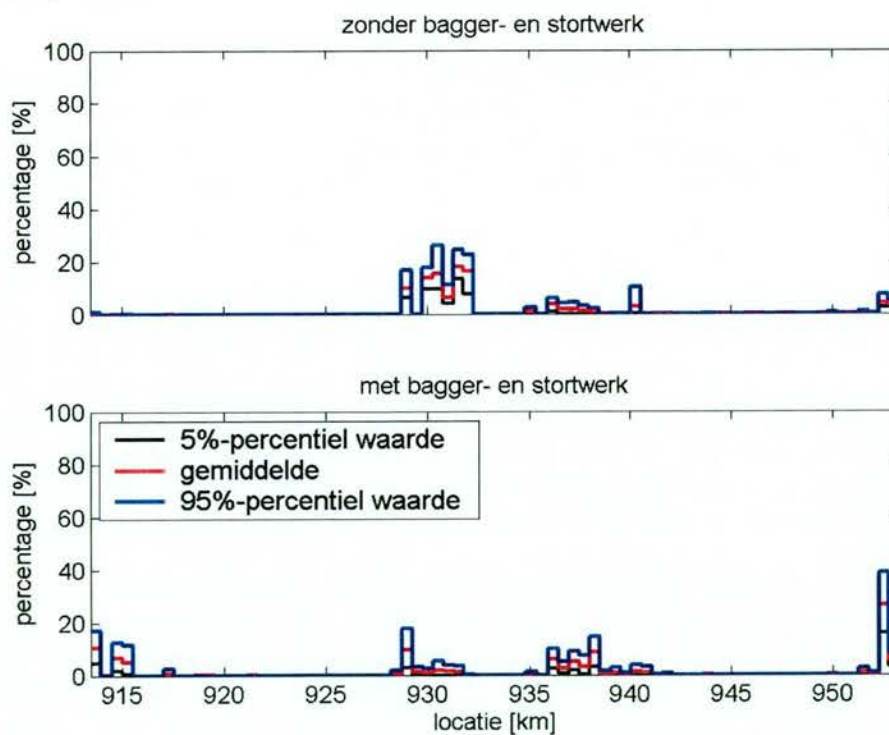
b. Riviertraject Waal 2



c. Riviertraject Waal 3



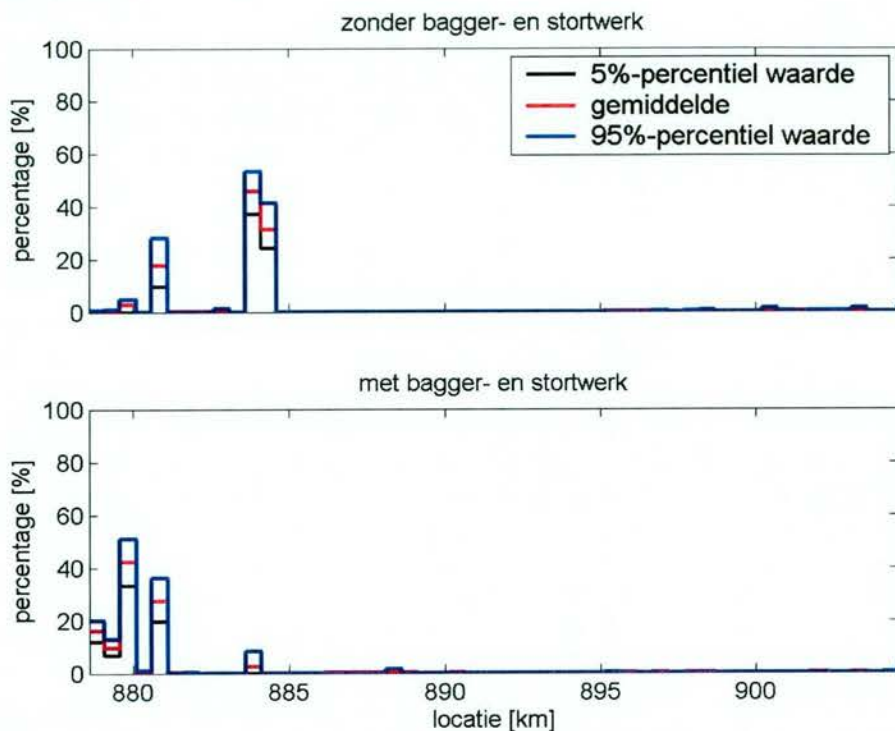
d. Riviertraject Waal 4



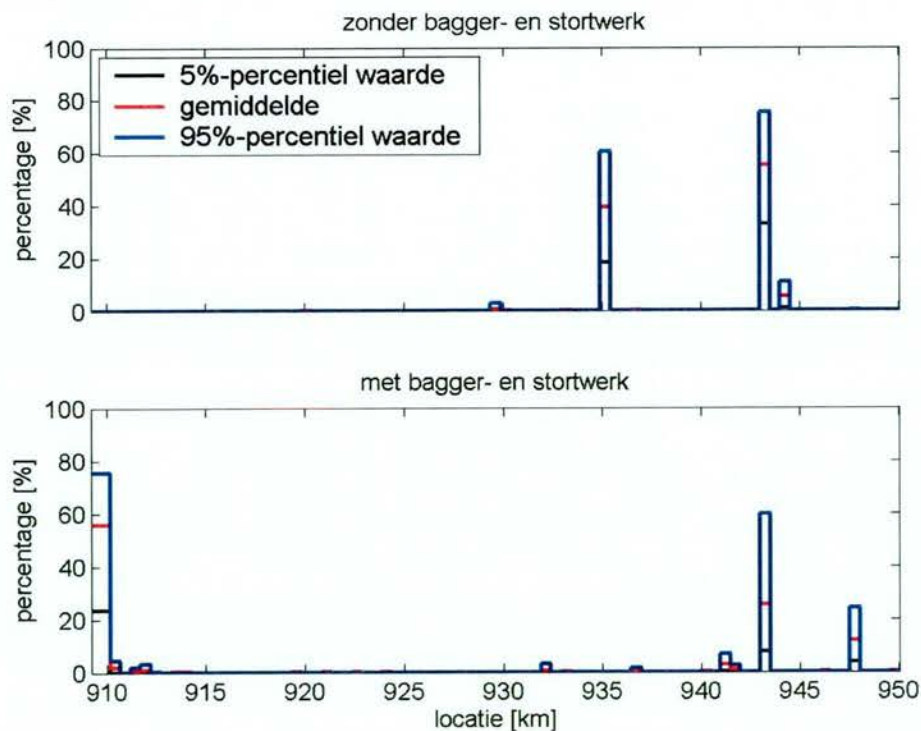
### Locaties maatgevende waterdiepte op IJssel

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie x bevindt voor het ruimtelijk alternatief zonder en met bagger- en stortwerk.

a. Riviertraject IJssel 1

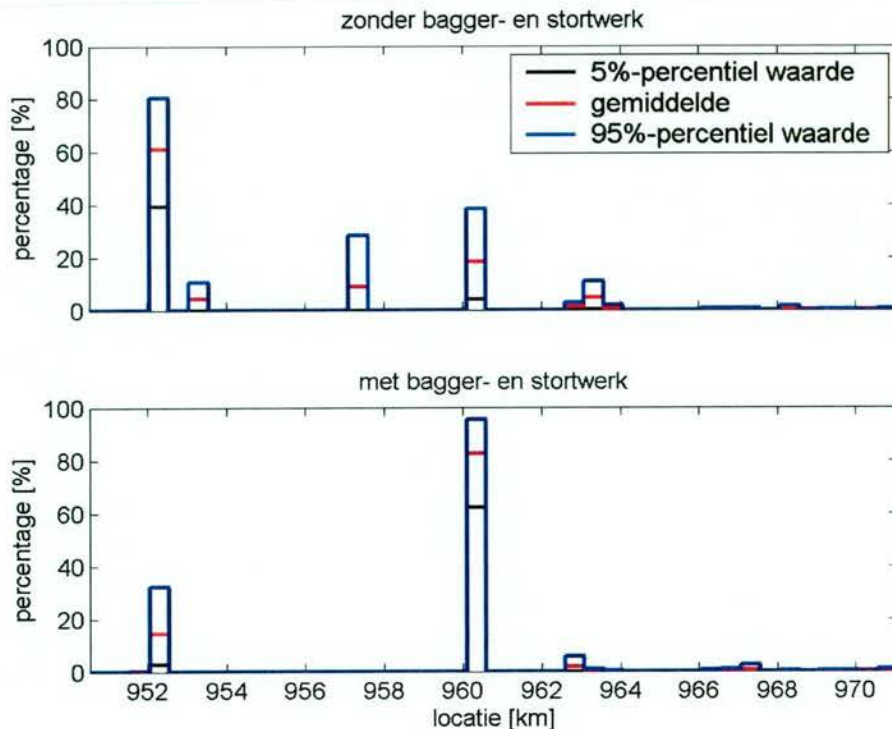


b. Riviertraject IJssel 2

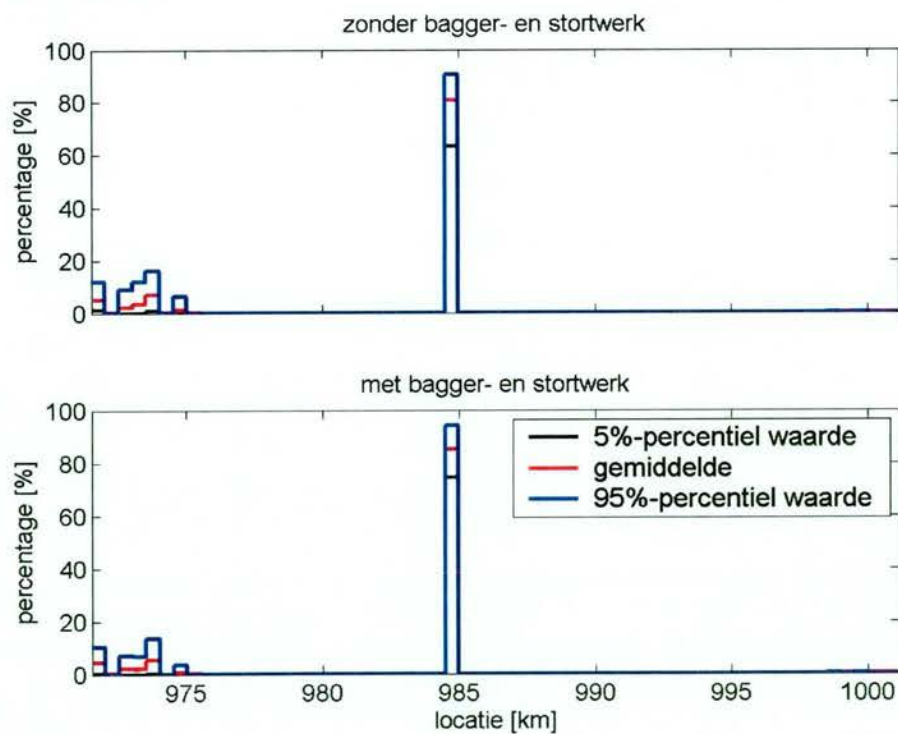




c. Riviertraject IJssel 3



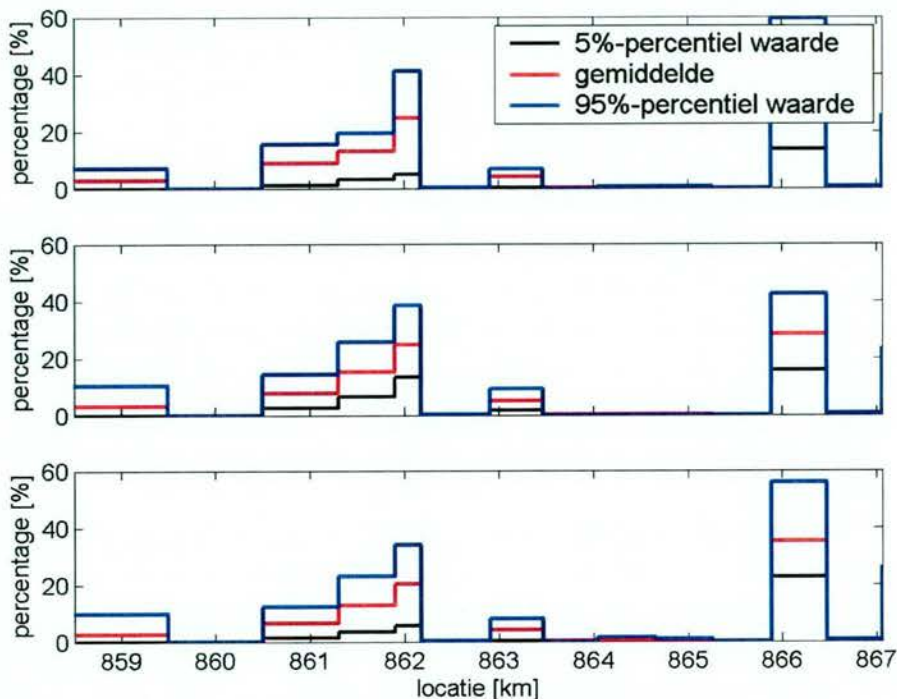
d. Riviertraject IJssel 4



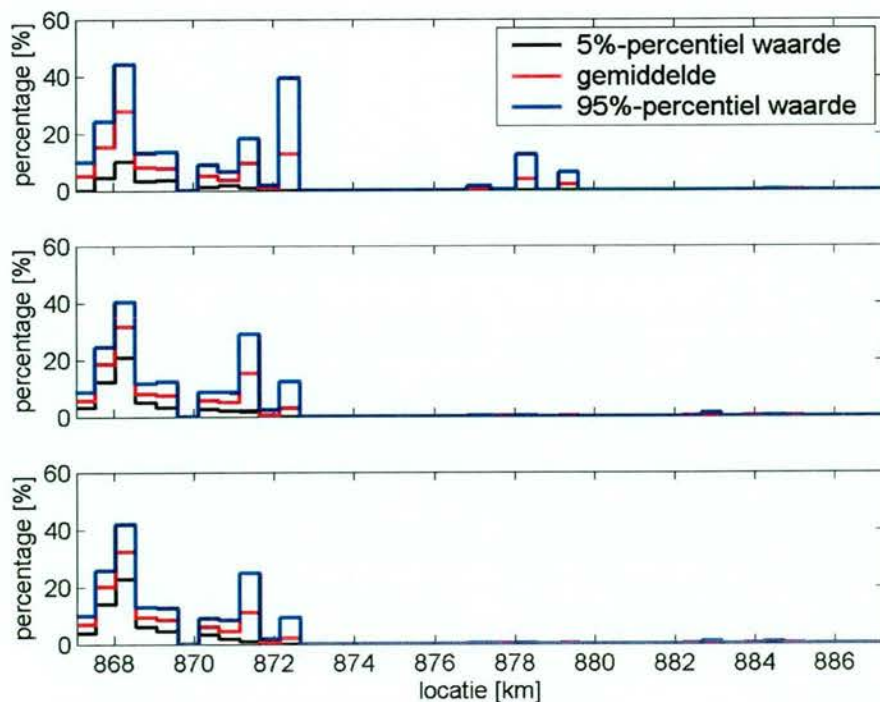
### Locaties maatgevende waterdiepte op Bovenrijn en Waal

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt voor alle RvdR-riviertrajecten in de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur).

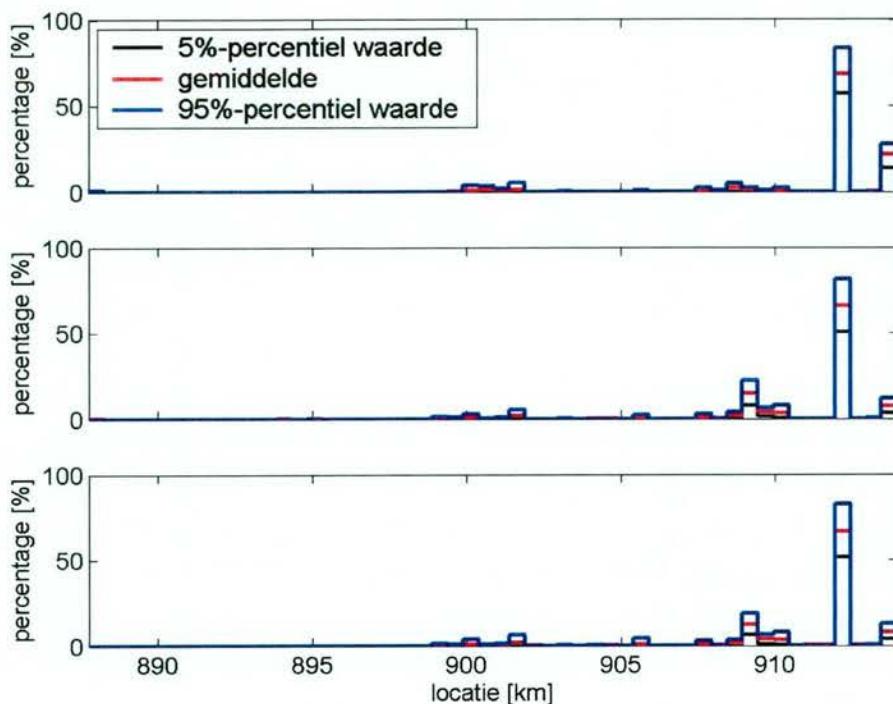
a. Riviertraject Waal 1



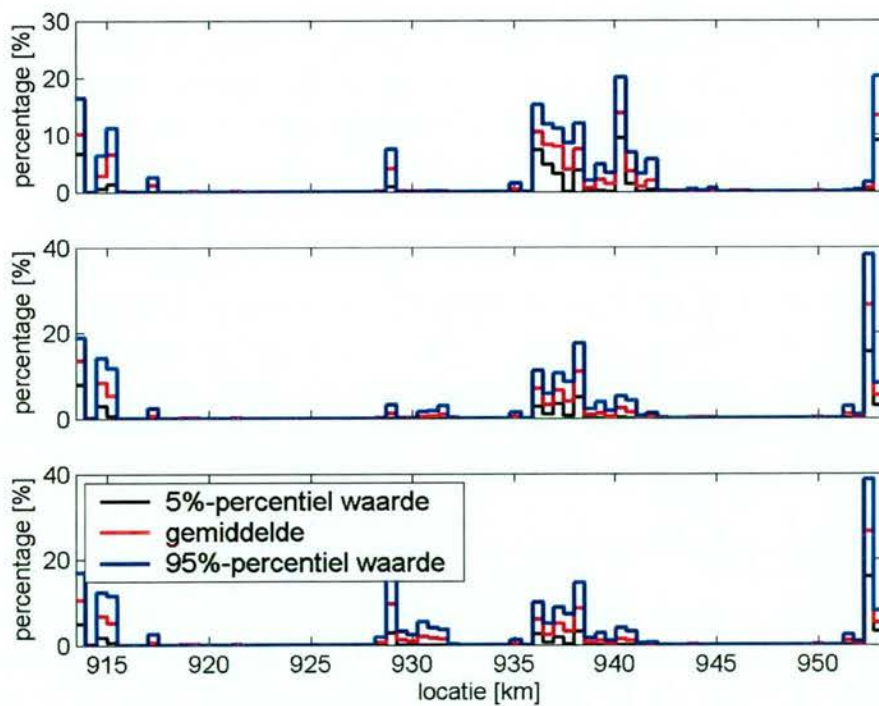
b. Riviertraject Waal 2



c. Riviertraject Waal 3



d. Riviertraject Waal 4

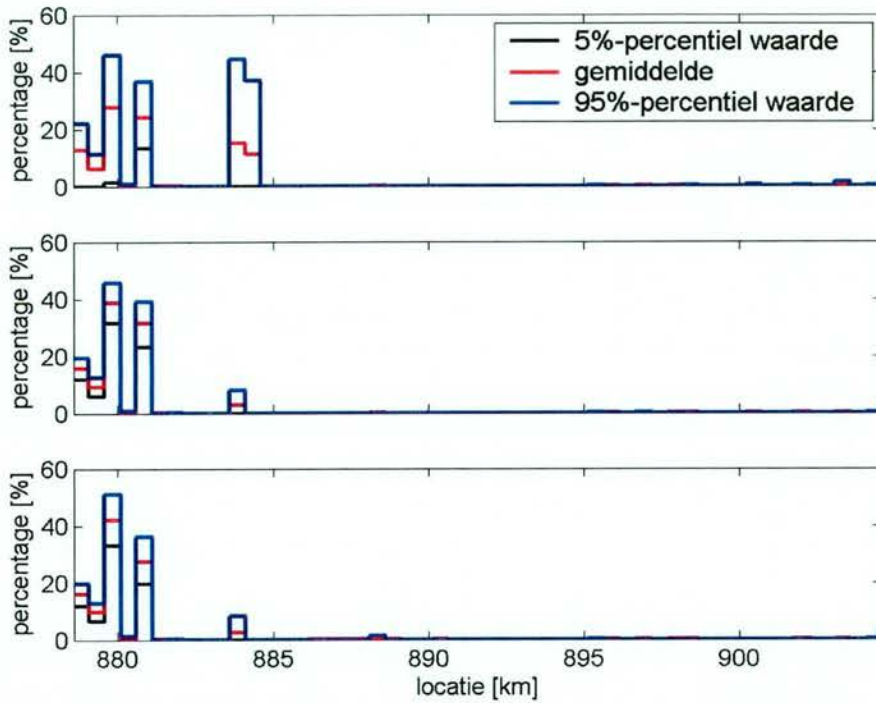




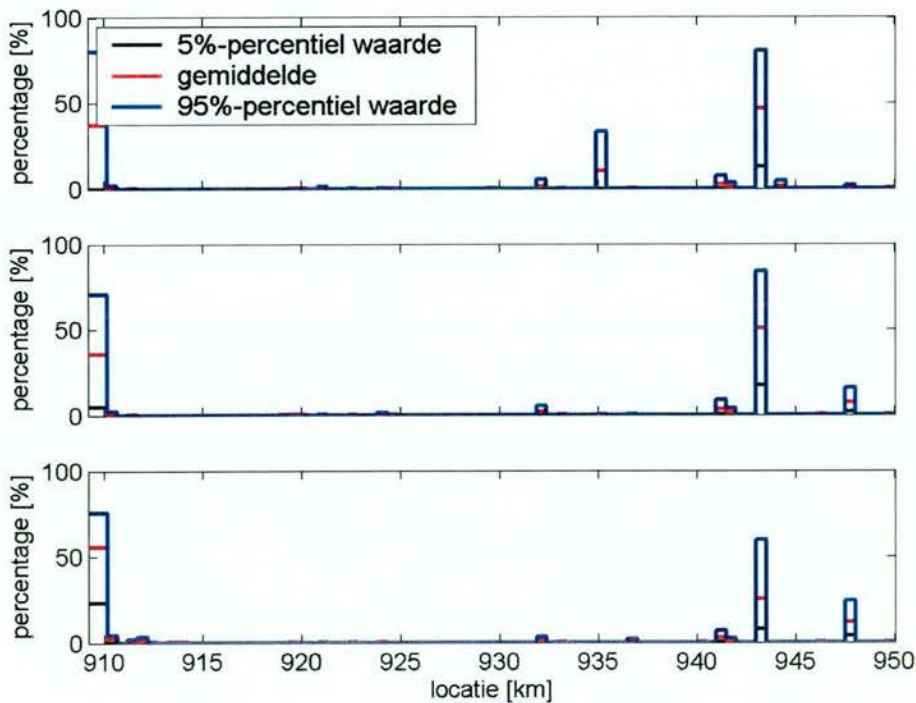
### Locaties maatgevende waterdiepte op IJssel

de statistische karakteristieken van de kans dat de maatgevende waterdiepte en de MGD zich op locatie  $x$  bevindt voor alle RvdR-riviertrajecten in de uitgangssituatie (bovenste panel in figuur), budgetalternatief (middelste panel in figuur) en ruimtelijk alternatief (onderste panel in figuur).

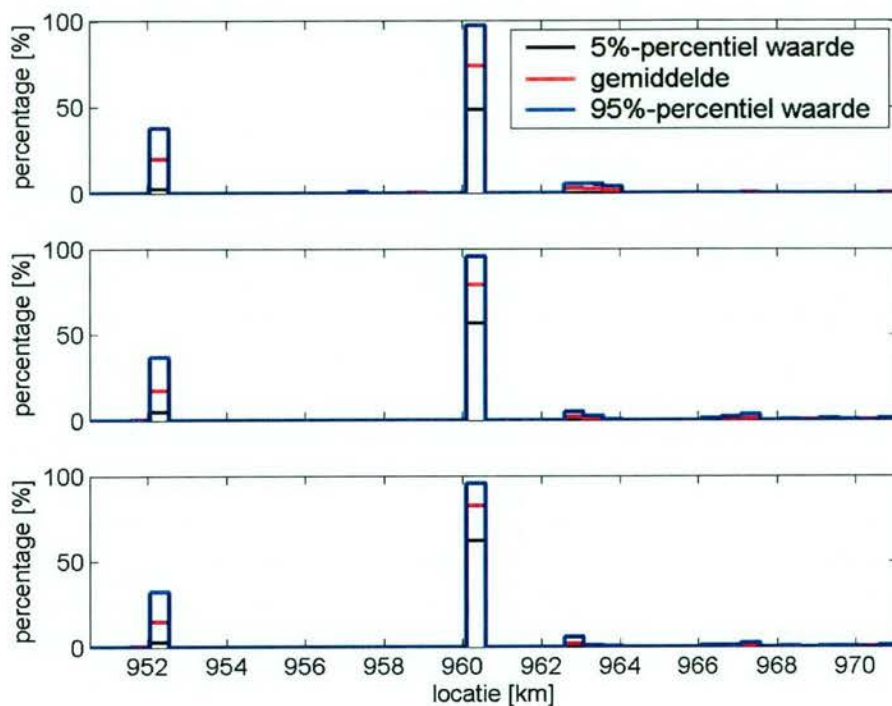
a. Riviertraject IJssel 1



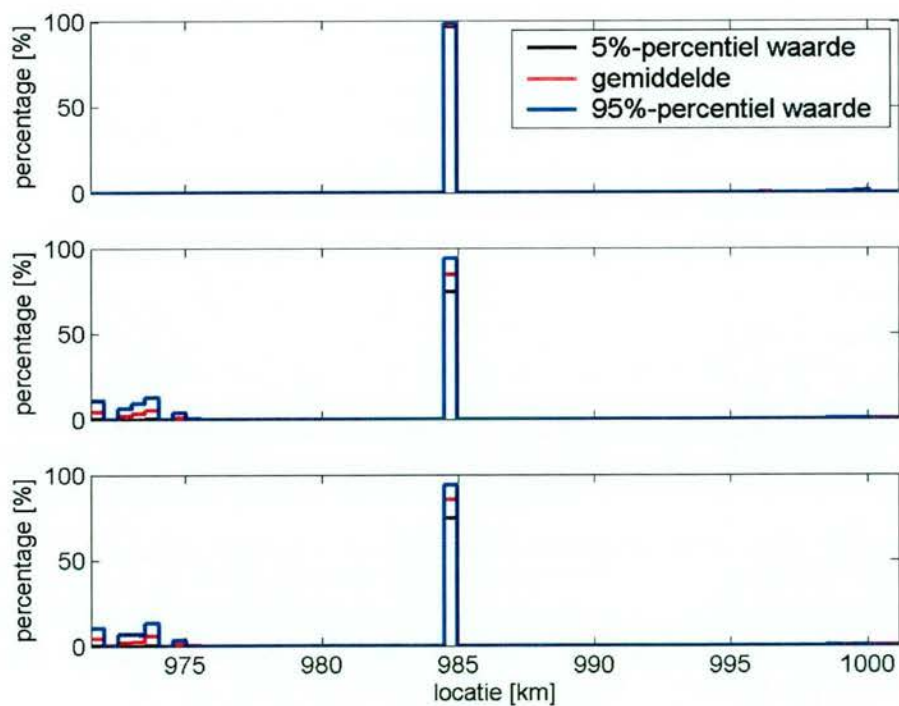
b. Riviertraject IJssel 2



c. Riviertraject IJssel 3

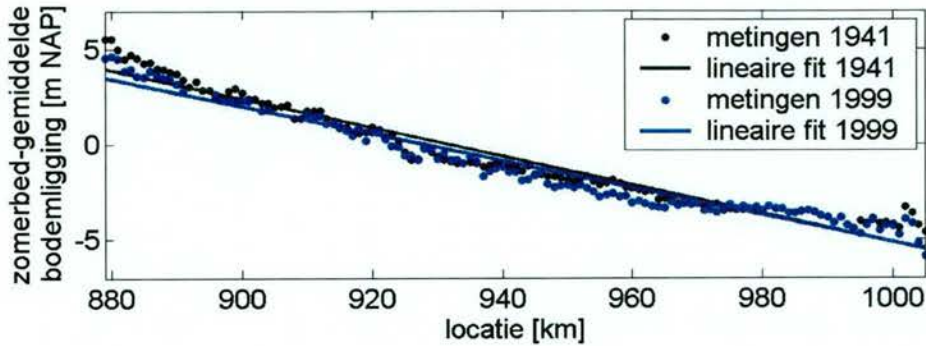


d. Riviertraject IJssel 4



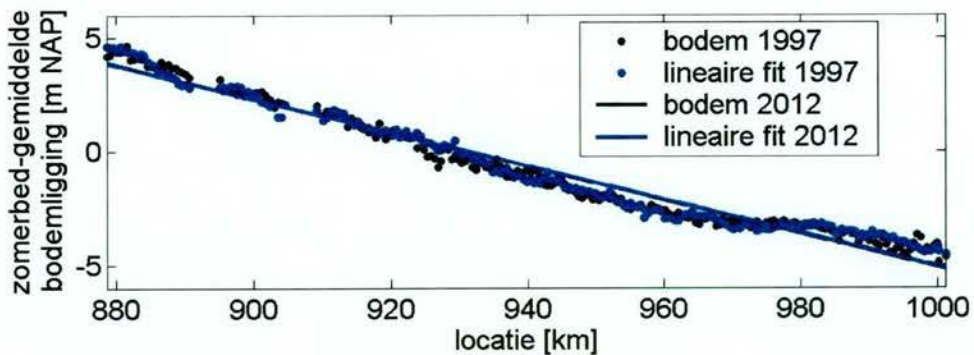
## Bijlage 9: Overeenstemming stochastische resultaten met meetgegevens

a.



jaar :	1941	1999
lineaire correlatie coefficient =	-0.973	-0.977
lineaire fit - factor a	-7.5e-005	-7.1e-005
lineaire fit - factor b	4	3.5
standaardafwijking t.o.v. de lineaire fit =	0.63m	0.56m
Spearman rank correlatie coefficient =	-0.997	-0.993
een significante trend	ja	ja

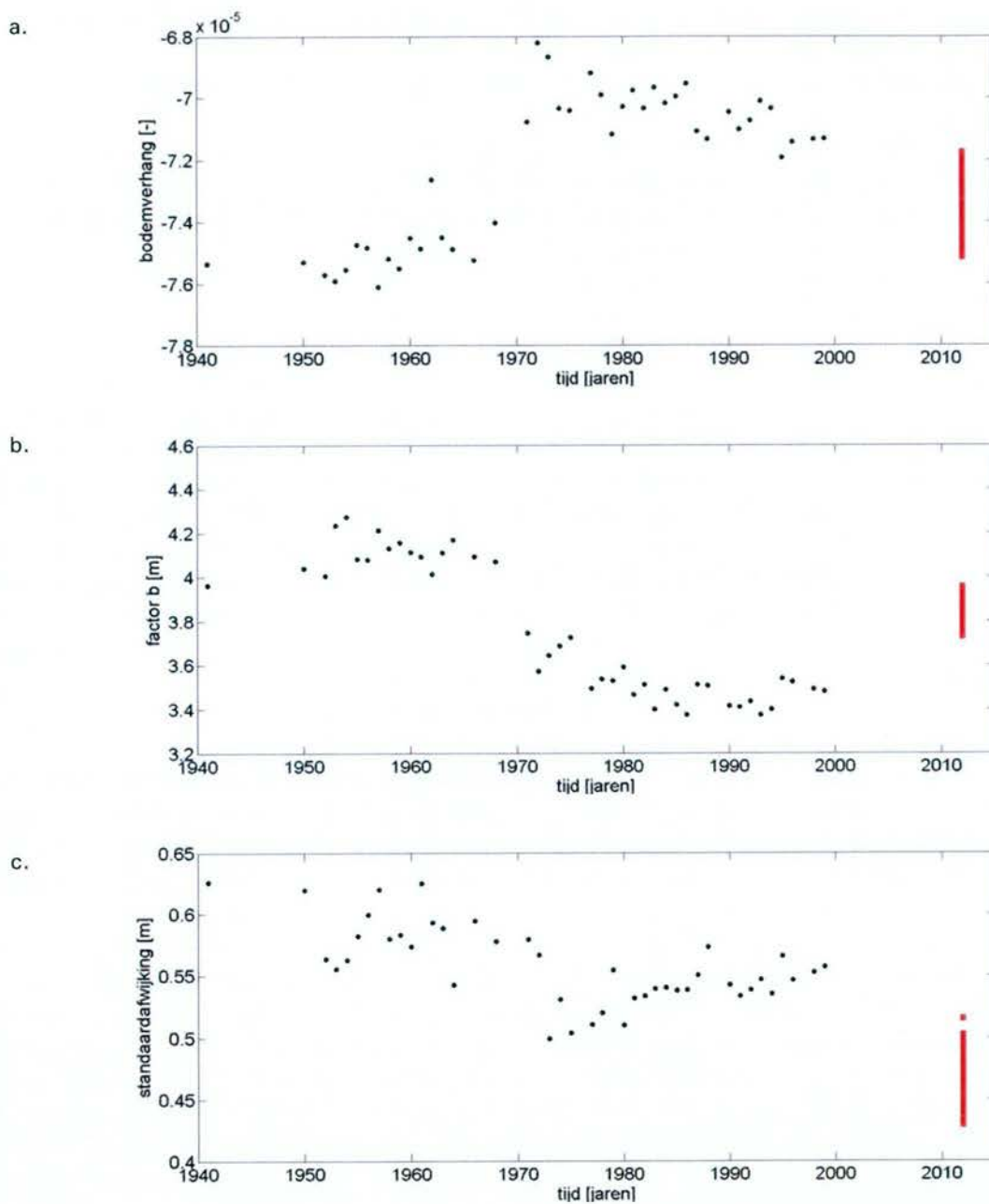
b.



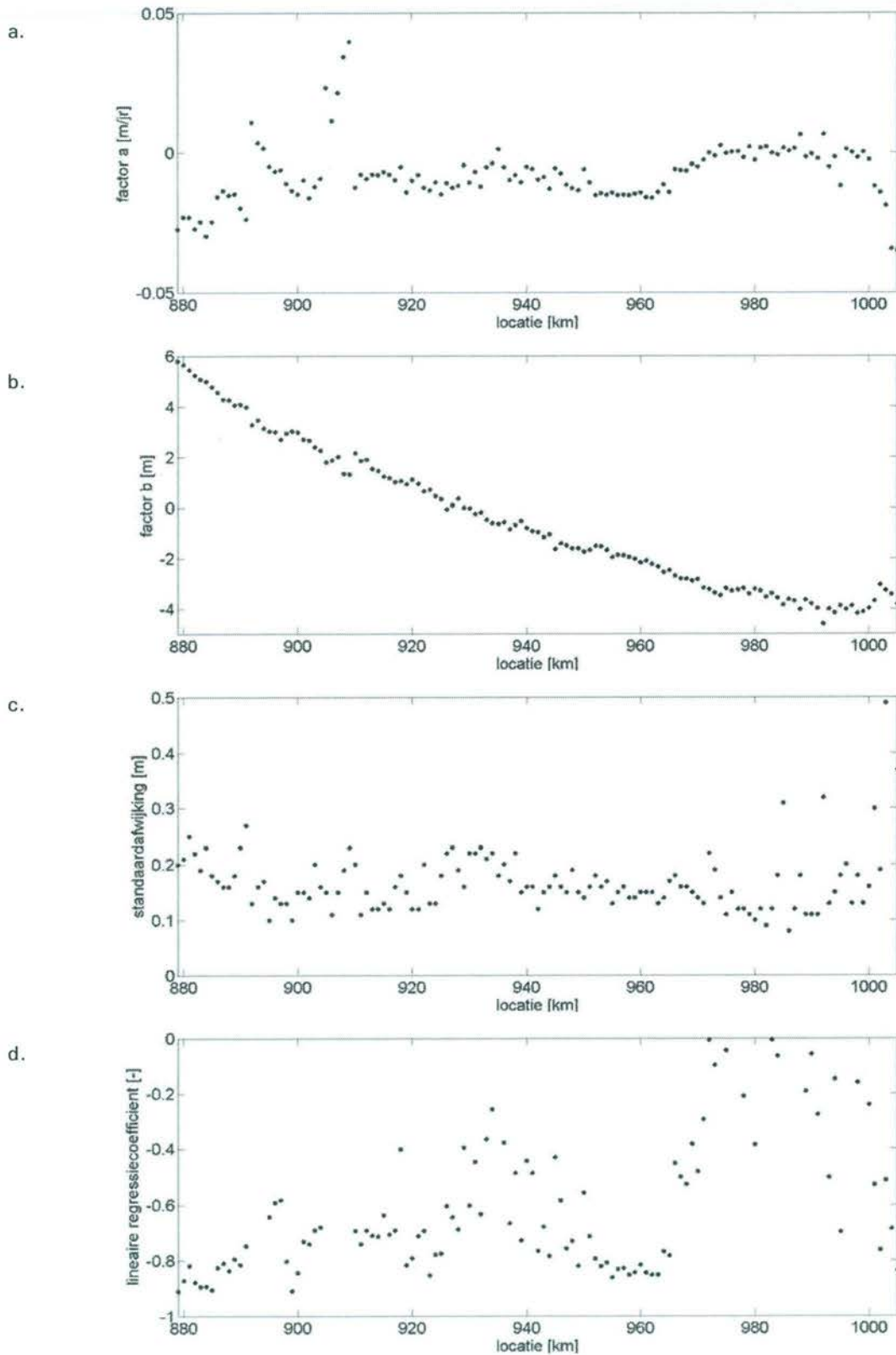
jaar :	1997	2012 - simulatie 1
lineaire correlatie coefficient =	-0.984	-0.983
lineaire fit - factor a	-7.4e-005	-7.4e-005
lineaire fit - factor b	3.9	3.9
standaardafwijking t.o.v. de lineaire fit =	0.47m	0.48m
Spearman rank correlatie coefficient =	-0.995	-0.995
een significante trend	ja	ja

Figuur B.9-1. (a) de bodemmetingen en het lineaire verband voor de IJssel in 1941 en 1999 en (b) de dwarsdoorsnede gemiddelde bodemvoorspellingen voor SOBEX-simulatie 1 en het lineaire verband voor de IJssel in 1997 en 2012.

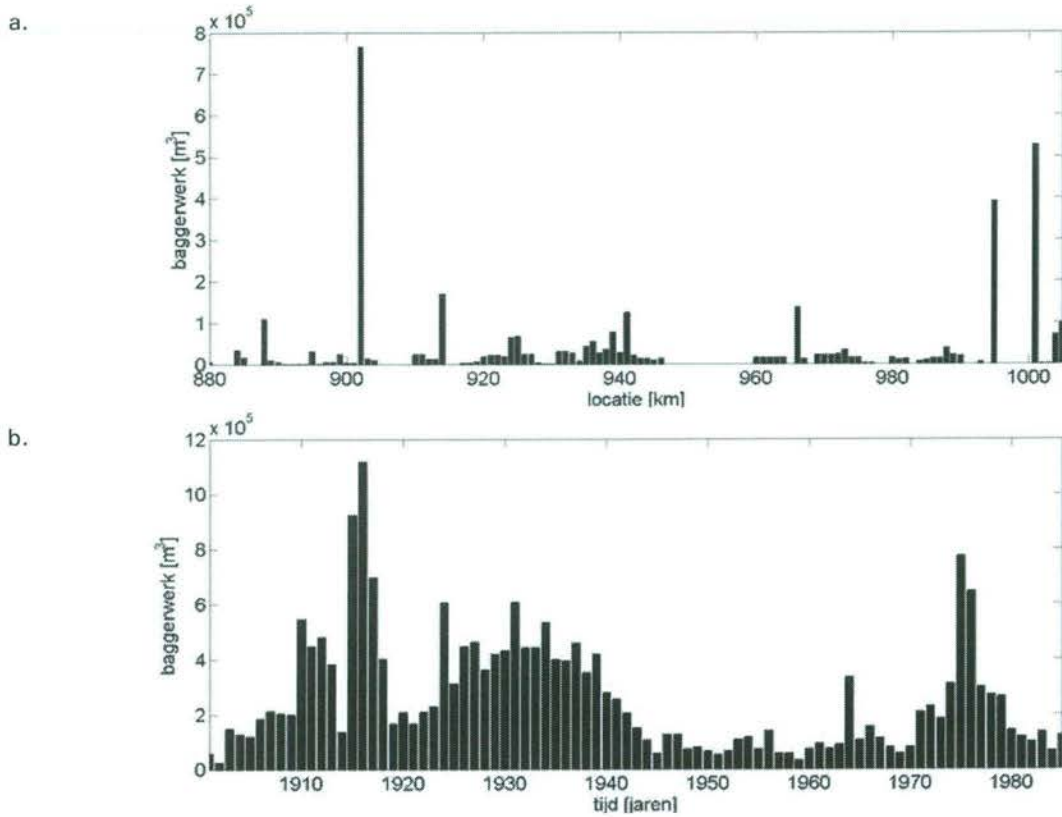




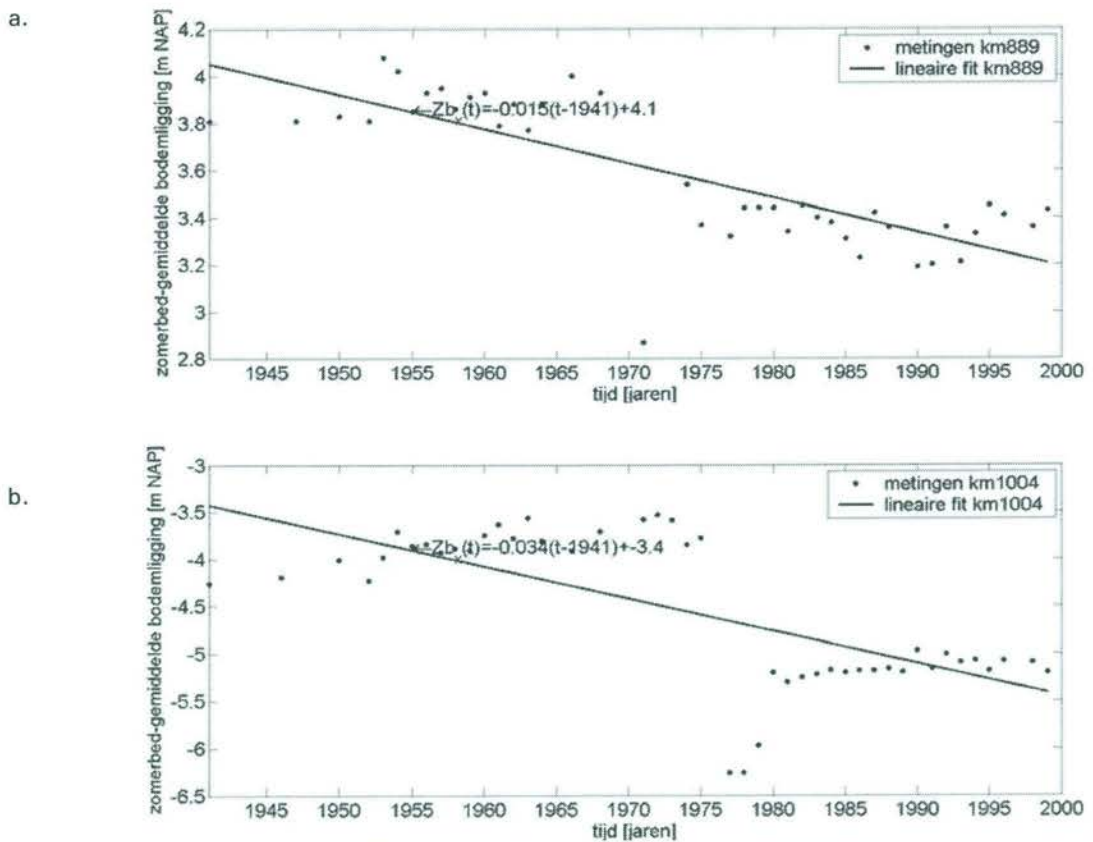
Figuur B.9-2. het verloop van factor a, factor b en de standaardafwijking van de bodemligging ten opzichte van het lineaire verband over de meetperiode 1940-1999 in de IJssel.



*Figuur B.9-3. het verloop van factor a, factor b, de standaardafwijking van de bodemligging ten opzichte van het lineaire verband en (d) de lineaire regressiecoëfficiënt voor de IJssel.*

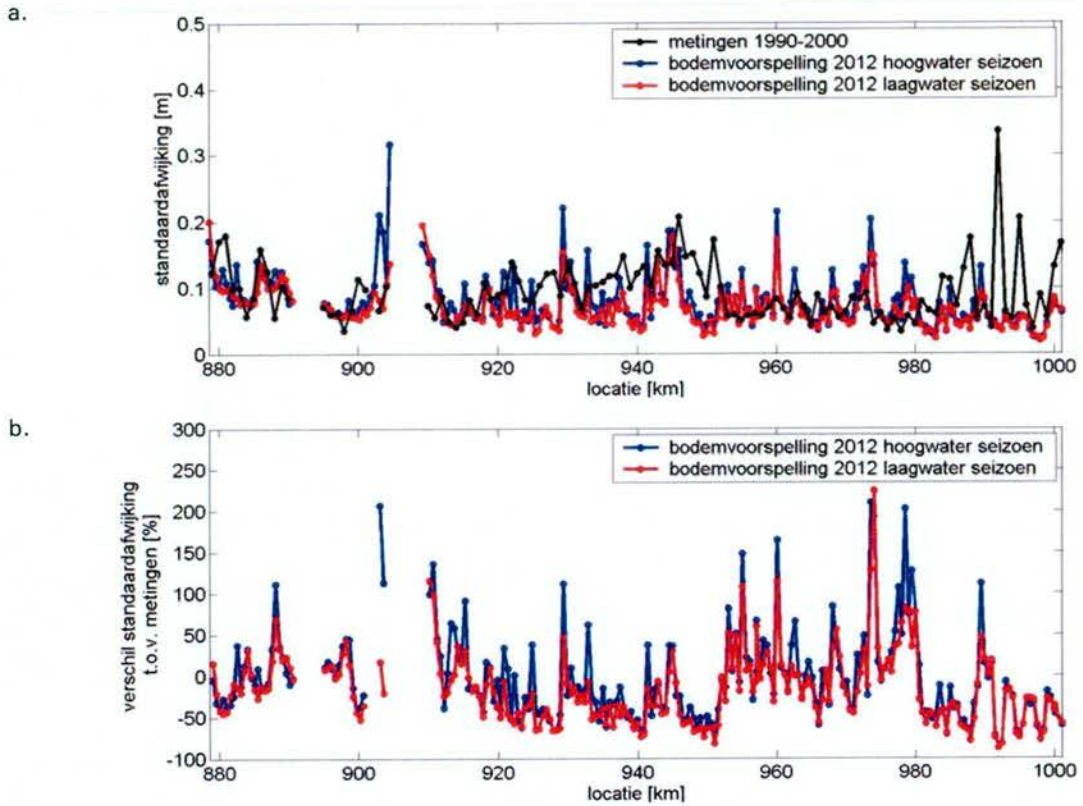


Figuur B.9-4. (a) baggerwerk per rivierlocatie in de IJssel over een periode 1900-1996 en (b) baggerwerk per jaar in de periode 1900-1996 in de IJssel.



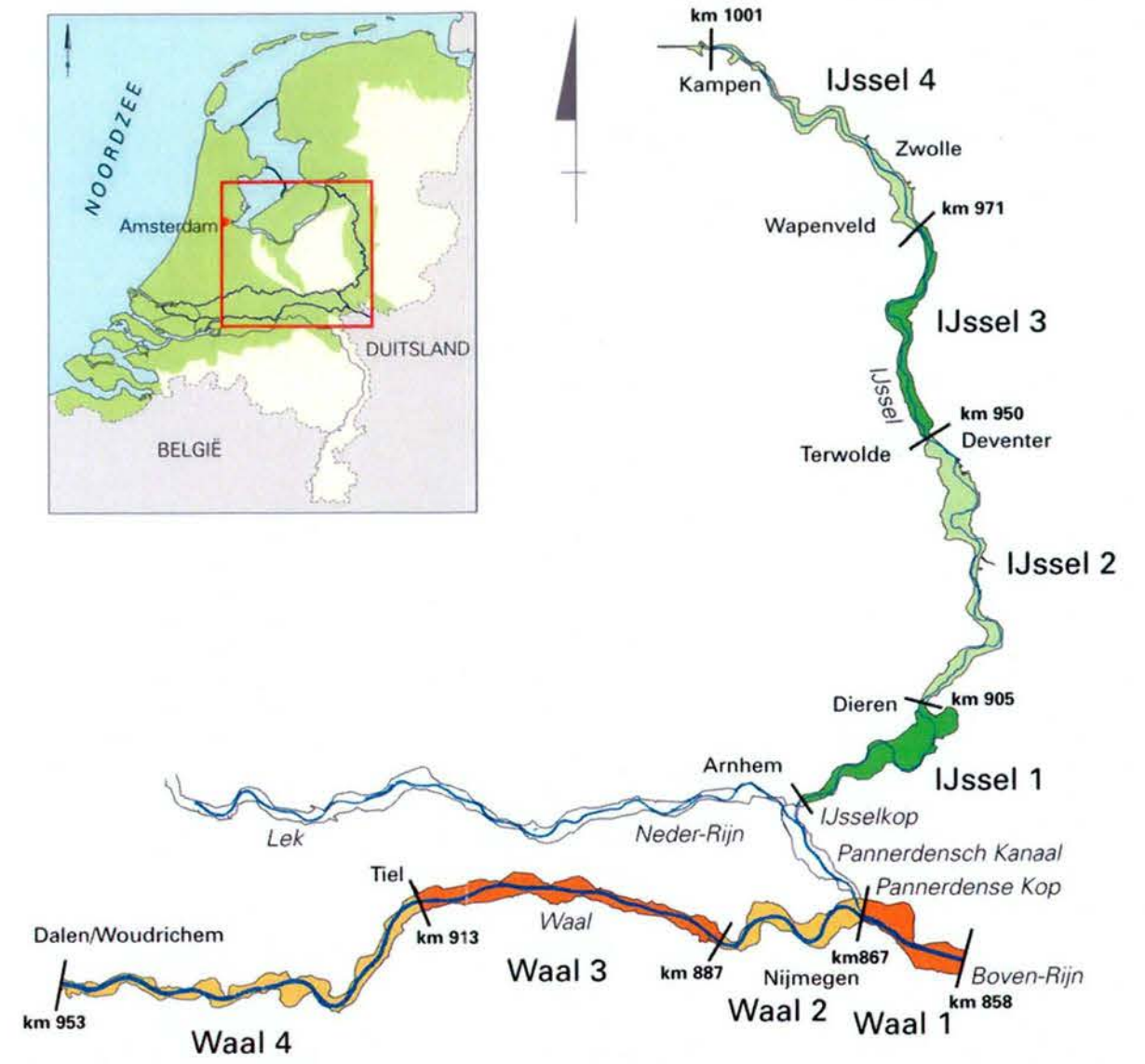
Figuur B.9-5. (a) zomerbed-gemiddelde bodemligging in de periode 1926-1999 voor rivierlocatie (a) km 889 en (b) km 1004 in de IJssel.





Figuur B.9-6. (a) standaardafwijking rond de gemiddelde bodemligging volgens uit metingen in de periode 1990-2000 en bepaald uit de stochastische modelvoorspellingen in 2012 in het hoog- en laagwaterseizoen voor de IJssel en (b) het procentuele verschil tussen de standaardafwijking bepaald uit metingen en modelvoorspellingen.

## Bijlage 10: Trajectindeling Rijntakken









HKV LIJN IN WATER  
Postbus 2120  
8203 AC Lelystad

Telefoon: 0320 294242  
Telefax: 0320 253901  
e-mail: [info@hkv.nl](mailto:info@hkv.nl)

Bezoekadres:  
Botter 11 nr. 29  
Lelystad