



# Trends in de afvoerverdeling bij laagwater

RIZA rapport 2000.043

Dit rapport is te bestellen à f 25,- per stuk bij Cabri Mailservice, Postbus 431, 8200 AK Lelystad,  
Tel. 0320-285333, Fax. 0320-241121, E-mail riza@cabri.nl

Betaling na levering; een acceptgiro wordt bijgevoegd.

*Het rapport is gratis voor dienstonderdelen van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.*

This publication can be ordered at DFL 25,- per copy through Cabri Mailservice, PO Box 431,  
8200 AK Lelystad, The Netherlands, Tel. +31 320 285333, Fax. +31 320 241121, E-mail riza@cabri.nl  
Payment on delivery.



# Trends in de afvoerverdeling bij laagwater

RIZA rapport 2000.043

ISBN 9036953421

Auteur: ir. M.H.I. Schropp

RIZA

Arnhem, september 2000



Inhoudsopgave

.....

<b>Samenvatting.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding.....</b>	<b>7</b>
1.1 Probleemstelling.....	7
1.2 Doelstelling .....	7
<b>2 Ontwikkelingen in de afvoerverdeling bij OLR .....</b>	<b>9</b>
2.1 De afvoerverdeling bij OLR vanaf 1900 tot heden.....	9
2.2 Toekomstige ontwikkelingen .....	14
2.3 Gevoeligheidsanalyse .....	21
<b>3 Mogelijke sturingsmaatregelen en hun effecten .....</b>	<b>25</b>
3.1 Mogelijke maatregelen.....	25
3.2 Hydraulische en morfologische effecten .....	25
<b>4 Conclusies en aanbevelingen .....</b>	<b>35</b>
4.1 Conclusies .....	35
4.2 Aanbevelingen .....	36
<b>Referenties.....</b>	<b>37</b>
<b>Bijlagen.....</b>	<b>39</b>
<b>1 Figuren gevoeligheidsonderzoek.....</b>	<b>41</b>



## Lijst met figuren

Figuur 1 Overzichtskaart splitsingspunten.....	8
Figuur 2 Waalafvoer bij OLR gestuwd en ongestuwd.....	9
Figuur 3 Procentuele afvoerdeling 1900-1990 bij 'open rivier'.....	10
Figuur 4 Verloop OLR ongestuwd.....	11
Figuur 5 Bodemontwikkeling Rijntakken 1900-1990.....	12
Figuur 6 Prognose afvoerdeling oorspronkelijke model.....	13
Figuur 7 Prognose OLR Lobith oorspronkelijke model.....	14
Figuur 8 Prognose bodemontwikkeling oorspronkelijke model.....	15
Figuur 9 Prognose afvoerdeling na aanvullende ijking.....	17
Figuur 10 Prognose OLR Lobith na aanvullende ijking.....	18
Figuur 11 Prognose bodemontwikkeling na aanvullende ijking.....	19
Figuur 12 Effecten van constructies op de afvoerdeling en de OLR.....	19
Figuur 13 Ontwikkeling MHW autonoom en met bodemschermen.....	20
Figuur 14 Zand storten in het Pannerdens Kanaal.....	26
Figuur 15 Zand storten in de Bovenrijn.....	27
Figuur 16 Zand baggeren uit de Waalbochten en storten in het Pan. Kanaal.....	27
Figuur 17 Ontwikkeling MHW bij zand storten in het Pannerdens Kanaal.....	28
Figuur 18 Aanpassen kribhoogten Waal.....	30
Figuur 19 Aanpassen kribhoogten Pannerdens Kanaal.....	30
Figuur 20 Vergroten ruwheid Pannerdens Kanaal.....	31
Figuur 21 Toekomstige afvoerdeling bij ongewijzigde stuwinstellingen.....	32
Figuur 22 Afvoerdeling bij gecorrigeerd stuwprogramma.....	33
Figuur 23 Alternatieve stuwprogramma's.....	34
Figuur 24 Gevoeligheid gekozen afvoerregime.....	41
Figuur 25 Gevoeligheid jaarlijkse sedimentvracht te Lobith.....	42
Figuur 26 Gevoeligheid gebruikte transportformule.....	42
Figuur 27 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Bovenrijn.....	43
Figuur 28 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Waal.....	43
Figuur 29 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Pan. Kanaal.....	44
Figuur 30 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Nederrijn.....	44
Figuur 31 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - IJssel.....	45
Figuur 32 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - alle takken.....	45
Figuur 33 Gevoeligheid verdeling sediment - Pannerdense Kop.....	46
Figuur 34 Gevoeligheid verdeling sediment - IJsselkop.....	46

## Lijst met tabellen

Tabel 1 Morfologische ijking Sobek.....	16
Tabel 2 Wijziging afvoerdeling MHW door bodemontwikkeling ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).....	21
Tabel 3 Calibratiefactoren in verschillende modellen.....	23
Tabel 4 Wijziging afvoerdeling bij MHW in 2024 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).....	29

---

# Samenvatting

---

De verdeling van de afvoer over de Rijntakken is in de tijd niet constant. Als gevolg van veranderingen in de bodemligging in de omgeving van de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop, al of niet door menselijk ingrijpen, is in het lage afvoerbereik de Waalafvoer sinds ca. 1930 enkele procenten afgenomen ten gunste van vooral de IJsselafvoer. Deze trend wordt vooral veroorzaakt doordat de bodem van het Pannerdens Kanaal relatief sneller daalt dan die van de Waal. Als deze trend zich doorzet kan dit tot steeds grotere vaardieptebeperkingen op de Waal leiden, en dus tot economische schade.

De Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat heeft het RIZA opdracht gegeven te onderzoeken hoe de afvoerdeling bij OLR zich de komende decennia zal ontwikkelen, en met welke maatregelen deze ontwikkeling eventueel is bij te sturen. Dit onderzoek is uitgevoerd met het Sobekmodel voor de Rijntakken, waarbij het noodzakelijk bleek het model aanvullend te ijken, teneinde trendbreuken in afvoerdeling, waterstanden en bodemligging op de overgang van verleden naar toekomst te voorkomen. Voor de toekomst wordt een verdere afname van de Waalafvoer verwacht ten gunste van de IJsselafvoer, en een verdere daling van de zomerbedbodem en de waterstanden in de omgeving van de splitsingspunten. De vaste laag op de bodem van het zomerbed bij Nijmegen, de bodemkribben bij Erlecom, en de voorgenomen bodemschermen in de Waalbochten bij Haalderen en Hulhuizen versterken deze trend in de afvoerdeling enigszins, doordat de bodemdaling van de Waal door de constructies afgeremd wordt, maar die van het Pannerdens Kanaal niet. In een gevoeligheidsanalyse is onderzocht in hoeverre deze voorspellingen afhangen van de gekozen waarde voor de modelparameters. Deze analyse wijst uit dat de voorspelde trends vooral gevoelig zijn voor de sedimentvracht bij Lobith, en de formulering van het sedimenttransport op de Waal.

Vervolgens is onderzocht met welke maatregelen de trend in de afvoerdeling is bij te sturen. Met name het storten van ca. 40.000 m<sup>3</sup> zand per jaar in het Pannerdens Kanaal is een effectieve sturingsmaatregel. Ook het vergroten van de ruwheid van het Pannerdens Kanaal door middel van een vaste laag of bodemkribben is een mogelijke maatregel, maar dit leidt tot zeer sterke bodemdaling benedenstrooms van de IJsselkop, en is daarom af te raden. Het aanpassen van het stuwprogramma van stuw Driel is niet voldoende om de trend in het afnemende afvoeraandeel van de Waal bij te sturen. Een maatregel als het aanpassen van de kribhoogten leverde bij het doorrekenen onbetrouwbare resultaten op.

Of het bijsturen van de trend in de afvoerdeling behalve mogelijk ook noodzakelijk is, zal nadere studie moeten uitwijzen. Een betere morfologische ijking van de Sobekschematisatie is in ieder geval wel noodzakelijk.





---

# 1 Inleiding

---

## 1.1 Probleemstelling

De bodemligging van de Rijntakken laat sinds het begin van deze eeuw een dalende tendens zien. Oorzaken hiervoor zijn de normalisaties van eind 19<sup>e</sup> en begin 20<sup>e</sup> eeuw, en de zandwinning in het zomerbed van de rivier. Het tempo van de bodemdaling wordt onder meer beïnvloed door reeds uitgevoerde en nog te nemen maatregelen in de Waalbochten tussen de Pannerdense Kop en Nijmegen, ter verbetering van de Waal als scheepvaartweg. De verwachtingen voor de toekomst lopen uiteen van een voortgaande daling tot een stabilisatie van de bodemligging op het huidige niveau.

De veranderingen in de bodemligging van het zomerbed in de omgeving van de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop zijn van invloed op de afvoerverdeling over de Rijntakken. Omdat de bodemdaling niet op alle takken even sterk is, is ook de afvoerverdeling over de Rijntakken over langere periode bezien niet constant. In (Schropp, 1999) is onder andere onderzocht wat het effect is van de bodemontwikkeling op de afvoerverdeling bij Maatgevend Hoogwater (MHW). Er is echter niet bekend wat in het lage afvoerbereik het effect is van de bodemontwikkeling op de afvoerverdeling over de Rijntakken. Daarnaast ontbreekt inzicht in de aard en de effectiviteit van de middelen waarmee de afvoerverdeling in het lage bereik eventueel bijgestuurd kan worden, indien de autonome trend tot onacceptabele gevolgen leidt. Kennis hieromtrent is van belang in verband met de gevolgen van de gewijzigde afvoerverdeling voor de vaardiepte op met name de Waal, en de watervoorziening van Nederland in tijden van droogte. Ook de morfologische ontwikkeling zelf wordt, via de met de afvoerverdeling samenhangende verdeling van het sediment over de splitsingspunten, deels gestuurd door de verdeling van de afvoer.

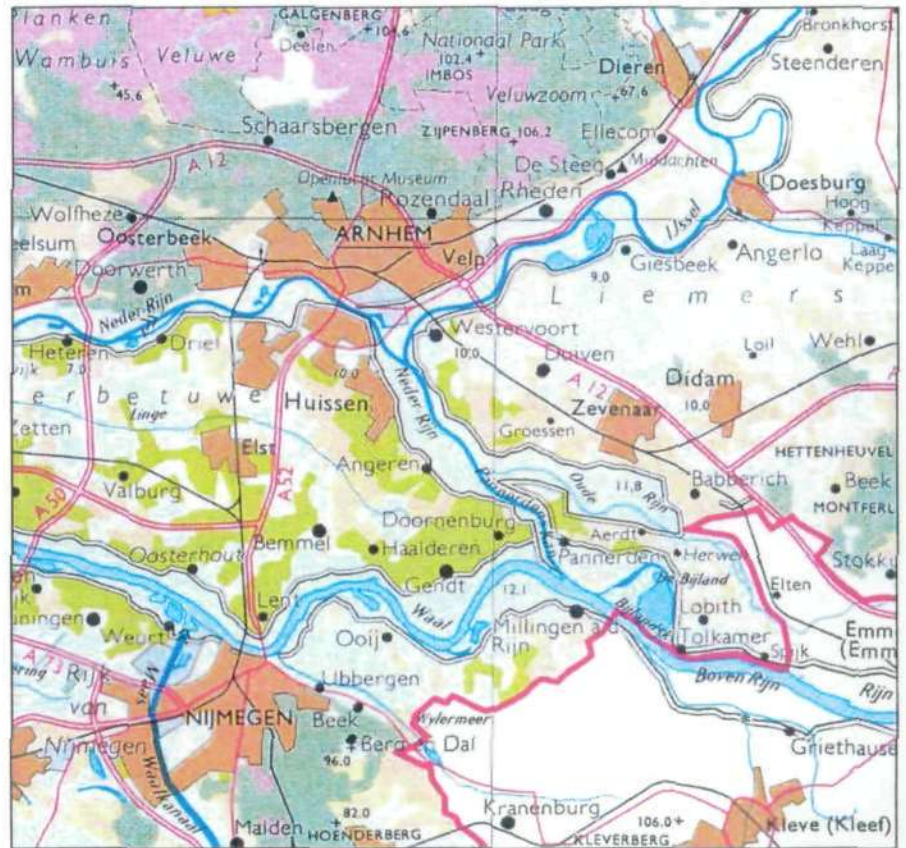
## 1.2 Doelstelling

RWS / Directie Oost-Nederland heeft het RIZA gevraagd een onderzoek uit te voeren naar de toekomstige afvoerverdeling over de Rijntakken in het lage afvoerbereik onder invloed van morfologische processen, en aan te geven met welke maatregelen de afvoerverdeling in het lage bereik is te sturen. Met het lage afvoerbereik worden hier Bovenrijnafvoeren tot 2000 m<sup>3</sup>/s bedoeld, met speciale aandacht voor de afvoer bij Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR), omdat deze als kenmerkend voor het lage afvoerbereik wordt beschouwd. De afvoer bij OLR is vastgesteld op 984 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, en wordt ca. 18 dagen per jaar onderschreden. In dit rapport wordt ingegaan op de volgende aspecten:

- Hoe is de afvoerverdeling over de Rijntakken in het lage afvoerbereik in het verleden geweest.
- Wat is de prognose voor de afvoerverdeling bij OLR tot 2050, zoals berekend met het Sobekmodel voor de Rijntakken in een aantal scenario's voor de autonome ontwikkeling.

- Met welke maatregelen is de trend in de afvoerdeling in het lage bereik te sturen, en wat is de effectiviteit van deze maatregelen.
- Wat is de invloed van de autonome ontwikkeling en de sturingsmaatregelen op de MHW-standen.
- Wat is de onzekerheidsmarge rond de met Sobek berekende effecten als gevolg van morfologische processen.

Figuur 1 Overzichtskaat splitsingspunten.





# 2 Ontwikkelingen in de afvoerverdeling bij OLR

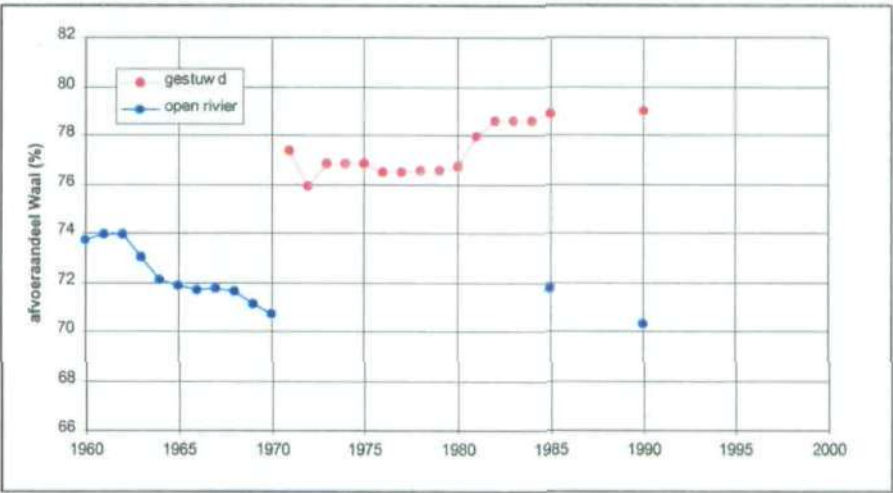
## 2.1 De afvoerverdeling bij OLR vanaf 1900 tot heden

De historische ontwikkeling van de afvoerverdeling over de periode 1900 - 1990 is voor Bovenrijnafvoeren van 984 (OLR), 2000, 6000 en 8000 m<sup>3</sup>/s beschreven in (Struijk, 1994). In Figuur 3 is de procentuele verdeling voor de twee laagste van deze afvoeren uitgezet, aangevuld met gegevens uit (Rijkswaterstaat, 1997). Afgezien van wat onregelmatigheden in de eerste decennia van de 20<sup>e</sup> eeuw, mogelijk als gevolg van de normalisatiewerken en/of door een andere manier van afvoermeting, zijn vanaf ca. 1930 de volgende trends in de afvoerverdeling te onderscheiden:

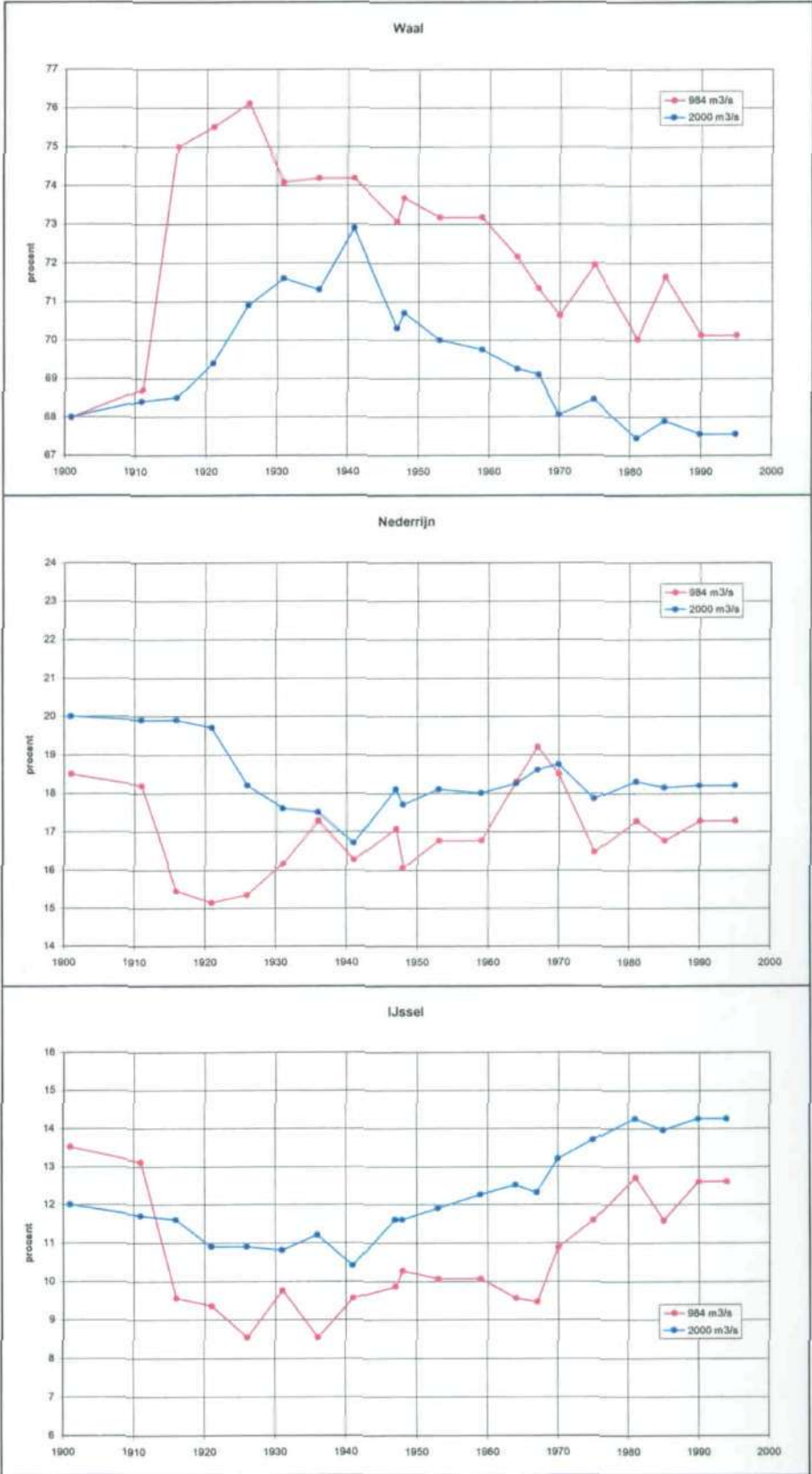
- Waal afnemend
- Nederrijn gelijkblijvend
- IJssel toenemend

De trends voor 984 m<sup>3</sup>/s en 2000 m<sup>3</sup>/s zijn vergelijkbaar, zodat het aannemelijk is dat voor alle afvoeren in het lage bereik de trends hetzelfde zijn. Het is van belang om in het oog te houden dat de afvoerverdeling in Figuur 3 voor beide Bovenrijnafvoeren is bepaald bij 'open rivier', ook voor de jaren na 1970, toen stuw Driel wel degelijk in bedrijf was. Dit is gedaan om de trendbreuk in de afvoerverdeling, veroorzaakt door de ingebruikname van stuw Driel te elimineren. Omdat de toestand 'open rivier' bij lage afvoeren zich sinds de Rijnkanalisatie slechts enkele keren heeft voorgedaan, is de afvoerverdeling voor 'open rivier' bij 984 m<sup>3</sup>/s en 2000 m<sup>3</sup>/s berekend door extrapolatie van de QH-relaties uit het hogere, ongestuwde afvoerbereik naar het lage afvoerbereik. Aangezien de QH-relaties in het lage bereik niet sterk gekromd zijn, is dit een verantwoorde en nauwkeurige berekeningswijze.

Figuur 2 Waalafvoer bij OLR gestuwd en ongestuwd.



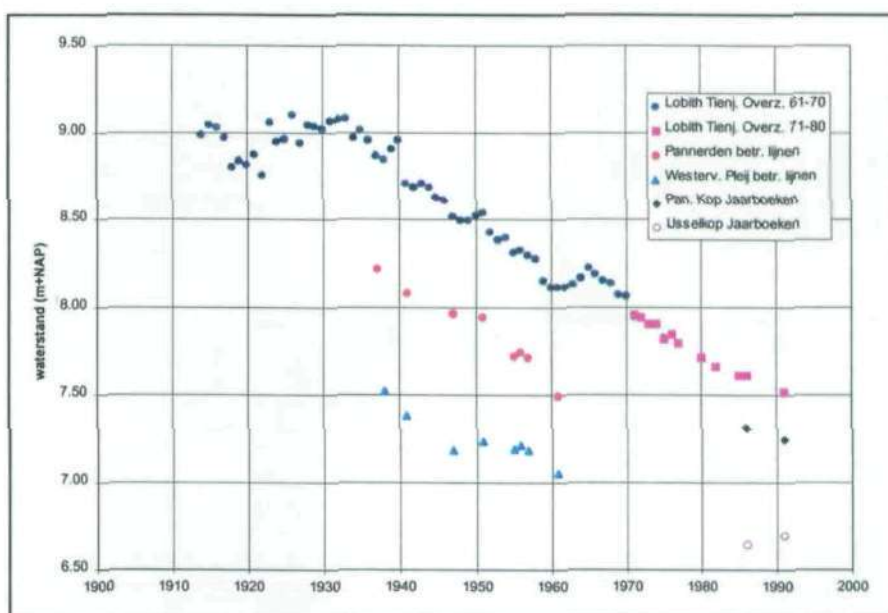
Figuur 3 Procentuele afvoerverdeling  
1900-1990 bij 'open rivier'.





In 1970 zijn de stuwen in de Nederrijn in gebruik genomen. Hierdoor veranderde de afvoerverdeling in het lage bereik, en wel zo dat de IJssel en de Waal meer water kregen ten koste van de Nederrijn. In Figuur 2 is het verloop van de Waalafvoer bij OLR uitgezet bij zowel ongestuwde als bij gestuwde rivier, ontleend aan de 'Jaarboeken der Waterhoogten'. Hoewel het afvoeraandeel bij open rivier afneemt, is er bij gestuwde rivier een stijgende trend. De belangrijkste oorzaak voor deze schijnbare tegenspraak is de aanpassing van het stuwprogramma van Driel rond 1980. Aanvankelijk werd op de Nederrijn bij lage afvoeren een spoeldebiet van 50 m<sup>3</sup>/s doorgelaten, later is dit teruggebracht tot 25 m<sup>3</sup>/s. Het verschil kwam ten goede aan de IJssel en de Waal.

Figuur 4 Verloop OLR ongestuwd.

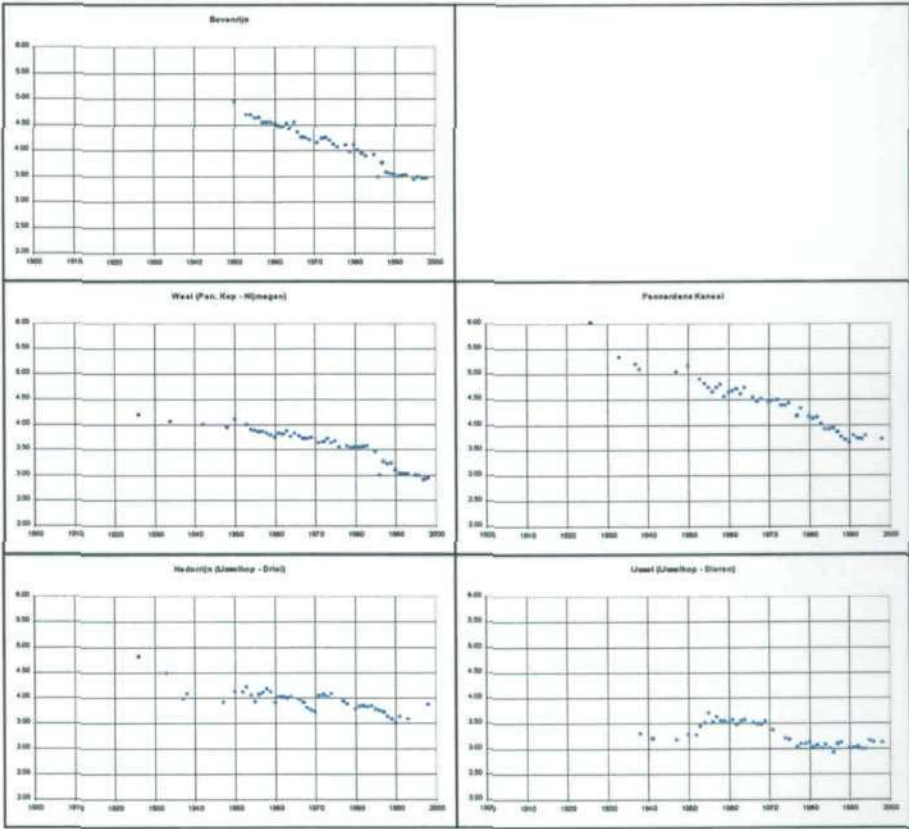


Behalve op de afvoerverdeling hebben veranderingen in bodemligging ook effect op de waterstanden. In Figuur 4 is op basis van verschillende bronnen voor de aantal locaties de OLR in de tijd uitgezet. Uit de waarnemingen voor Lobith is te zien dat rond 1930 een trendbreuk optreedt. De tot dan toe constante OLR vertoont vanaf 1930 een dalende trend, en dit is te zien als een afspiegeling van de ontwikkeling van de bodemligging in de omgeving van Lobith. De waarnemingen van de overige stations in Figuur 4 gaan niet ver genoeg terug om een trendbreuk te kunnen vaststellen, maar aangenomen mag worden dat de bodemdaling bij Lobith niet op zichzelf staat. Net als de bodemligging laat ook het verloop in de afvoerverdeling van Waal en IJssel rond 1930 een trendbreuk zien, zie Figuur 3. Voor 1930 neemt de Waalafvoer toe, na 1930 af, en vice versa voor de IJssel. Een mogelijke verklaring hiervoor is de voltooiing van de normalisatie van de IJssel in 1928, en die van het Pannerdens Kanaal en de Nederrijn in 1934, zie o.a. (Ploeger, 1992). Hierbij werd de normaalbreedte verkleind, en dus de waterdiepte, al of niet door baggeren, vergroot. Het netto resultaat is een grotere afvoercapaciteit van Pannerdens Kanaal, Nederrijn en IJssel.

De ontwikkeling van de bodemligging is behalve aan de hand van de OLR ook rechtstreeks te volgen aan de hand van bodempeilingen. In Figuur 5 is voor de omgeving van de splitsingspunten per deeltraject de gemiddelde bodemligging van het zomerbed uitgezet. Vóór 1950 zijn slechts incidenteel gegevens over de

bodemligging beschikbaar, na 1950 zijn de reeksen nagenoeg ononderbroken. In de figuren is te zien dat de bodemdaling van de Bovenrijn tussen 1950 en 1990 zelfs nog sterker is dan de daling van de OLR bij Lobith in dezelfde periode, met respectievelijk 1,5 m en 1,0 m. Voorts blijkt dat de bodem van het Pannerdens Kanaal in de periode 1950 - 1990 sneller is gedaald dan de bovenloop van de Waal, met respectievelijk 1,5 m en 1,0 m. De bodem van het Pannerdens Kanaal komt ten opzichte van de die van de Waal steeds minder hoog te liggen, en dit spoort met het gegeven van Figuur 3 dat het Pannerdens Kanaal in deze periode meer afvoer is gaan trekken, ten koste van de Waal. Rond de IJsselkop is de relatie tussen veranderingen in de bodemligging en de afvoerverdeling minder duidelijk. De bovenloop van Nederrijn en IJssel dalen tussen 1950 en 1990 allebei met 0,5 m, maar toch neemt de IJsselafvoer toe en blijft de Nederrijnafvoer gelijk. Dit is mogelijk een gevolg van de bochtafsnijdingen in de IJssel bij Doesburg en De Steeg. Hierdoor ontstaat een waterstandsverlaging bij de IJsselkop, waardoor meer water richting IJssel stroomt. De bodemligging bovenstrooms van de bochtafsnijding reageert niet onmiddellijk op de nieuwe situatie, maar zal zich uiteindelijk door te dalen aanpassen. De gemiddelde bodemligging van de bovenloop van de IJssel blijft daarom in eerste instantie nagenoeg onveranderd, hoewel de IJsselafvoer toeneemt.

**Figuur 5** Bodemontwikkeling Rijntakken 1900-1990.

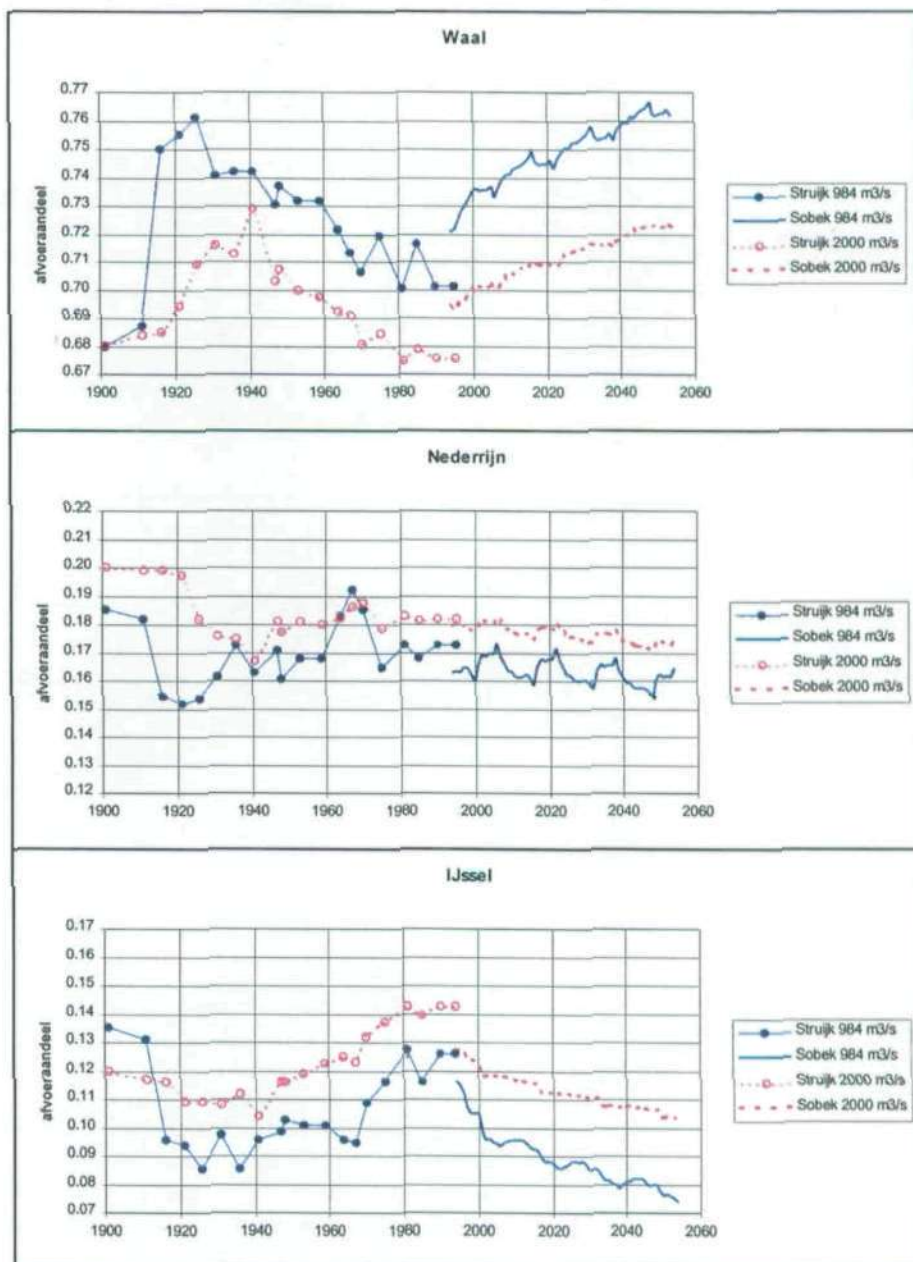


In (Visser, *in prep.*) wordt een beschrijving gegeven van de ontwikkeling van de bodemligging van de Rijntakken. Als voornaamste reden voor de bodemdaling wordt de zand- en grindwinning vanaf het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw genoemd, al of niet uitgevoerd in het kader van de normalisaties. De gebaggerde hoeveelheden overtroffen de door de rivier aangevoerde hoeveelheden ruimschoots. Op grond van berekeningen naar de evenwichtsbodemligging



voor de versmalde en genormaliseerde rivier, wordt de voorzichtige conclusie getrokken dat mede als gevolg van het uitgevoerde baggerwerk de bodem van de Rijntakken nu zijn evenwichtsligging heeft bereikt, en dat voor de toekomst dus geen verdere uitschuring verwacht hoeft te worden. Rond 1990 is een drastische wijziging in het baggerbeleid ingezet, waarbij voortaan geen zand meer door baggeren aan het riviersysteem onttrokken mocht worden. In Figuur 5 lijkt vanaf ca. 1990 inderdaad voor alle takken een zekere stabilisatie van de bodemligging op te treden, en voor de Nederrijn zelfs een aanzanding. De reeks is echter nog te kort om definitieve conclusies te kunnen trekken.

Figuur 6 Prognose afvoerverdeling oorspronkelijke model.



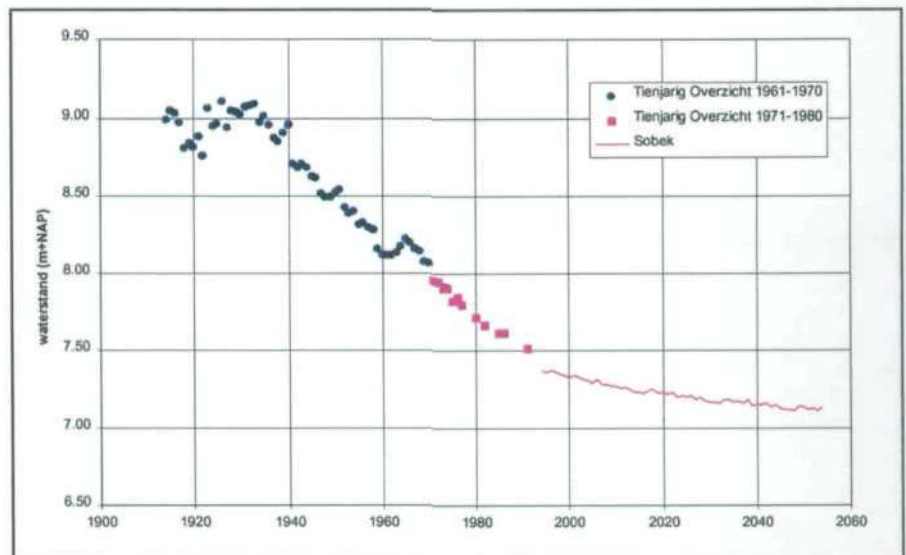
## 2.2 Toekomstige ontwikkelingen

Voor de Rijntakken is een Sobekmodel ontwikkeld, dat in eerste instantie op de waterbeweging is afgeregeld (Van der Veen *et al.*, 1997). Vervolgens zijn de morfologische parameters toegevoegd, en heeft een summierse ijking plaatsgevonden op de jaarlijkse sedimentvruchten en de bodemligging (Wolters, 1997). De uitgangssituatie in het model is de bodemligging van 1994. De vaste laag bij Nijmegen en de bodemkribben bij Erlecom zijn in de schematisatie opgenomen. Beide zijn geschematiseerd als trajecten met een verhoogde hydraulische ruwheid waar de bodem niet kan dalen.

### Oorspronkelijk model

In het kader van dit project is met het Rijntakkenmodel een prognose gemaakt voor de afvoerdeling bij OLR tot 2054. Dit is gedaan door een morfologische berekening uit te voeren, en na elk jaar op 1 januari bij de dan berekende bodem de afvoerdeling bij OLR te bepalen. De jaarlijkse afvoerdeling bij OLR is bepaald bij open rivier, teneinde de resultaten te kunnen vergelijken met de historische trend volgens (Struijk, 1994). In de morfologische berekening is het huidige stuwprogramma van stuw Driel (S-285) gehandhaafd. Er is uitgegaan van het huidige baggerbeleid, dat wil zeggen geen netto onttrekking van sediment in het bovenrivierengebied. De keuze voor het bepalen van de afvoerdeling op 1 januari is arbitrair. Op een andere datum zal de afvoer per tak systematisch iets hoger of lager zijn, maar de trend zal wel hetzelfde zijn.

Figuur 7 Prognose OLR Lobith oorspronkelijke model.



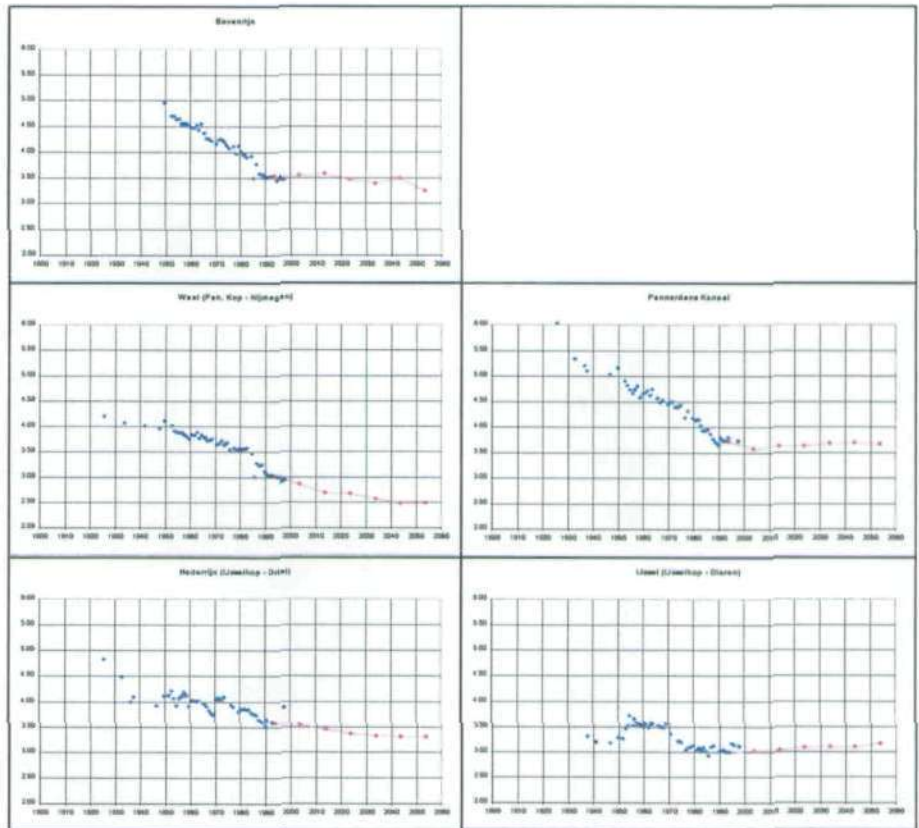
In Figuur 6 is de met Sobek berekende afvoerdeling gegeven voor 984 en 2000 m<sup>3</sup>/s, en in Figuur 7 de OLR bij Lobith. Bij de afvoerdeling valt ten eerste op dat er een sprong zit in het afvoeraandeel van Waal en IJssel op de overgang van gemeten naar berekende waarden. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de afvoerdeling in Sobek met een zekere marge (1 à 2%) is afgeregeld. Dit hoeft geen bezwaar te zijn, zeker niet wanneer vooral naar verschillen ten opzichte van een referentie wordt gekeken, en niet naar absolute waarden. Voor deze sprong is het model verder niet gecorrigeerd. Ten tweede valt bij de afvoerdeling op dat de met Sobek berekende trend afwijkt van de



historische trend. Ook de daling van de OLR te Lobith gaat in de toekomst langzamer dan in het verleden.

De toename van de Waalafvoer in de toekomst is te verklaren uit de bodemontwikkeling in de omgeving van de splitsingspunten. In Figuur 8 is te zien dat volgens Sobek van een bodemdaling op het Pannerdens Kanaal geen sprake meer is, terwijl de Waal wel blijft dalen. Ook de daling van de Bovenrijn, en dus van de OLR bij Lobith, is in Sobek veel minder sterk dan in het verleden.

**Figuur 8.** Prognose bodemontwikkeling oorspronkelijke model.



Een oorzaak voor de trendbreuk zou kunnen zijn, dat de vaste laag bij Nijmegen en de bodemkribben bij Erlecom wel in de berekening met Sobek zijn meegenomen, maar in de historische reeks (voor een groot deel) niet. Er is nagegaan hoe de toekomstige afvoerverdeling ten opzichte van de referentie verandert indien één of beide constructies uit de schematisatie worden verwijderd. De Waalbodem is dan gladder en kan nu wel dalen, hetgeen leidt tot meer afvoer via de Waal ten koste van Nederrijn en IJssel. Het elimineren van beide constructies versterkt dus de hierboven gesignaleerde trendbreuk in de afvoerverdeling. Het tempo van de daling van de OLR te Lobith is echter hoger dan in de situatie met constructies, en sluit wel beter aan bij de historische trend.

Een andere mogelijke verklaring voor de trendbreuk is de stuw bij Driel. De historische trend in de afvoerverdeling is voor het grootste deel (1900-1970) tot stand gekomen bij open rivier, omdat stuw Driel in die periode nog niet bestond. De morfologische berekening tot 2050 is echter uitgevoerd met het huidige stuwprogramma van stuw Driel (S-285). Er is daarom een morfologische berekening uitgevoerd waarin stuw Driel bij elke afvoer open

staat. Er blijkt dan dat de Nederrijn meer afvoer trekt ten koste van de Waal en de IJssel, en dat de OLR sneller daalt dan in de referentie. Dit betekent dat het verloop van de Waal beter aansluit bij het verleden, maar het verloop van de Nederrijn en de IJssel slechter. Ook de stuw bij Driel is dus niet de verklaring voor de trendbreuk.

**Aanvullende ijking**

Omdat voor de trendbreuk dus geen fysische oorzaak lijkt te bestaan, moet de conclusie zijn dat de Sobekschematisatie voor wat betreft de morfologie onvoldoende is afgeregeld, en dat een betere ijking noodzakelijk is. Er is daarom een aanvullende ijking op het Sobekmodel uitgevoerd, waarin is getracht de met Sobek berekende trend beter te laten aansluiten op de historische trend voor wat betreft de volgende aspecten:

- De afvoerverdeling bij open rivier (Figuur 6).
- De OLR bij Lobith (Figuur 7).
- De bodemontwikkeling rond de splitsingspunten (Figuur 8).

De situatie zonder vaste laag bij Nijmegen of bodemkribben bij Erlecom is het meest representatief voor de situatie in het verleden. Voor de toekomstberekeningen ten behoeve van de ijking, die moeten aansluiten op historische trends, zijn beide constructies dan ook uit de Sobekschematisatie verwijderd. De ijkingsparameters van het model zijn:

- De verdelingsfunctie van sediment over de splitsingspunten.
- De calibratiefactoren voor het sedimenttransport.

Over deze parameters is relatief het minste bekend, en dus bestaat hier de grootste vrijheid. Wel dienen de modelparameters binnen realistische marges gevarieerd te worden. Daarbij wordt voor het sedimenttransport gedacht aan maximaal een factor 2, omdat dit ook ongeveer de nauwkeurigheid is waarmee de grootte van het transport bekend is. Ten aanzien van de verdeling van sediment over de splitsingspunten zijn minder makkelijk harde criteria te geven, anders dan dat de grootste tak altijd het meeste sediment moet blijven ontvangen.

**Tabel 1** Morfologische ijking Sobek.

riviertak	aandeel sedimenttransport		calibratiefactor transportformule	
	oud (%)	nieuw (%)	oud (-)	nieuw (-)
Bovenrijn	100	100	1.0	1.0
Waal	83	90	0.9	0.9
Pann. Kanaal	17	10	1.1	1.5
Nederrijn	10	7	1.0	1.5
IJssel	7	3	1.0	1.5

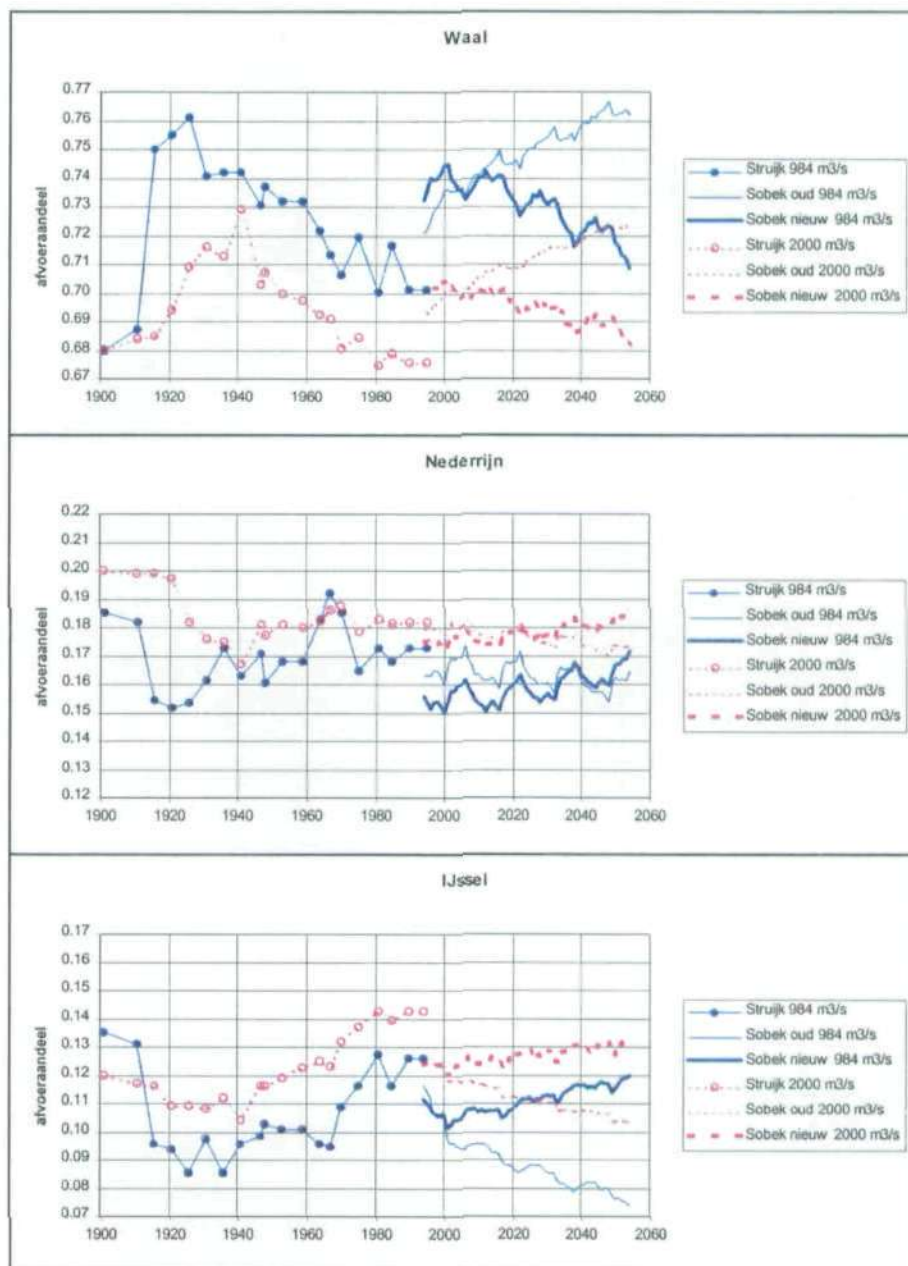
Na enige tientallen berekeningen zijn voor de ijkingsparameters de waarden gevonden van Tabel 1. In Figuur 9 is aangegeven hoe met de oude en de nieuwe parameters van Tabel 1 de afvoerverdeling eruit ziet. Voor de nieuwe parameters is de sprong in de afvoerverdeling rond 1994 groter, omdat de bodemkribben en de vaste laag uit de schematisatie zijn gehaald en de Waal dus initieel meer afvoer trekt. De trend voor de toekomst is voor alle takken echter wel in overeenstemming met die in het verleden.

De morfologische berekeningen voor Figuur 9 zijn uitgevoerd met stuw Driel in bedrijf. Omwille van de vergelijkbaarheid met het verleden is de toekomstige afvoerverdeling echter bij open rivier bepaald. Uit berekeningen waarin de toekomstige afvoerverdeling bij OLR wel bij gestuwde rivier (S-285) is bepaald, blijkt dat ook dan de Waalafvoer afneemt en de IJsselafvoer toeneemt, en wel



in hetzelfde tempo als bij open rivier. Dit komt omdat de bodemligging rond de splitsingspunten van overheersende invloed is op de afvoerdeling.

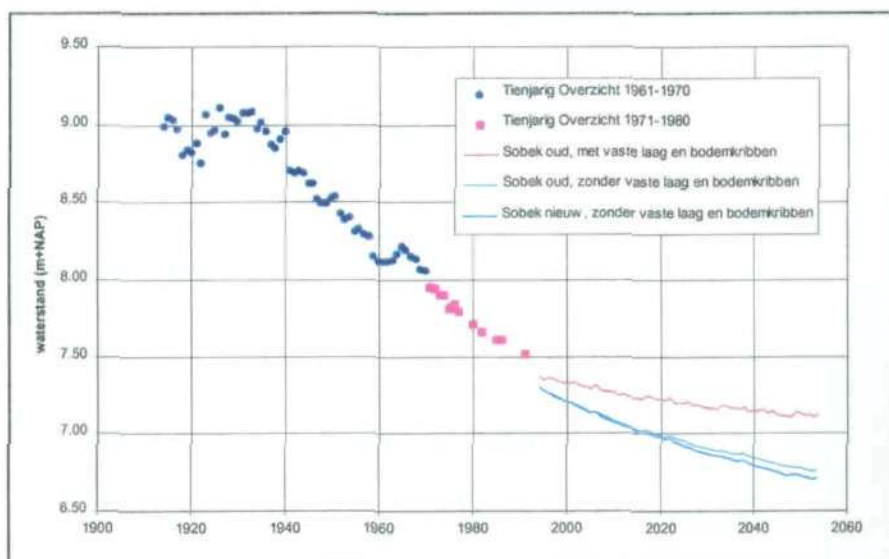
**Figuur 9** Prognose afvoerdeling na aanvullende ijking.



Het tempo van de daling van de OLR bij Lobith op de overgang van metingen naar berekeningen rond 1995 (Figuur 10) sluit ook beter aan, maar dit is niet zo zeer te danken aan de verbeterde ijking, als wel aan het feit dat de vaste laag bij Nijmegen en de bodemkribben bij Erlecom uit de schematisatie zijn gehaald.

In het herijkte model krijgt het Panterdons Kanaal minder sediment vanuit de Bovenrijn, en ook is de transportcapaciteit een stuk groter. Het resultaat is dat het Panterdons Kanaal sneller daalt, en dus meer afvoer trekt. De dalende bodem sluit aan bij de gemeten trend, zie Figuur 11. Voor de bodemligging van de Waal verandert er niet veel. Er komt vanuit de Bovenrijn meer sediment

Figuur 10 Prognose OLR Lobith na aanvullende ijking.



De prognose met Sobek van een over het algemeen dalende bodemligging, zowel in het oorspronkelijke model als in het herijkte model, spoort niet met de conclusie in (Visser, *in prep.*) dat de bodemdaling van de Rijntakken tot staan is gekomen. De verklaring voor het verschil is dat in (Visser, *in prep.*) impliciet is aangenomen dat het sedimentaanbod vanuit Duitsland nu hetzelfde is als vóór de normalisaties. Als wordt aangenomen dat het aanbod nu kleiner is, dan resulteert dit in de door Sobek berekende extra bodemdaling.

#### Invloed constructies

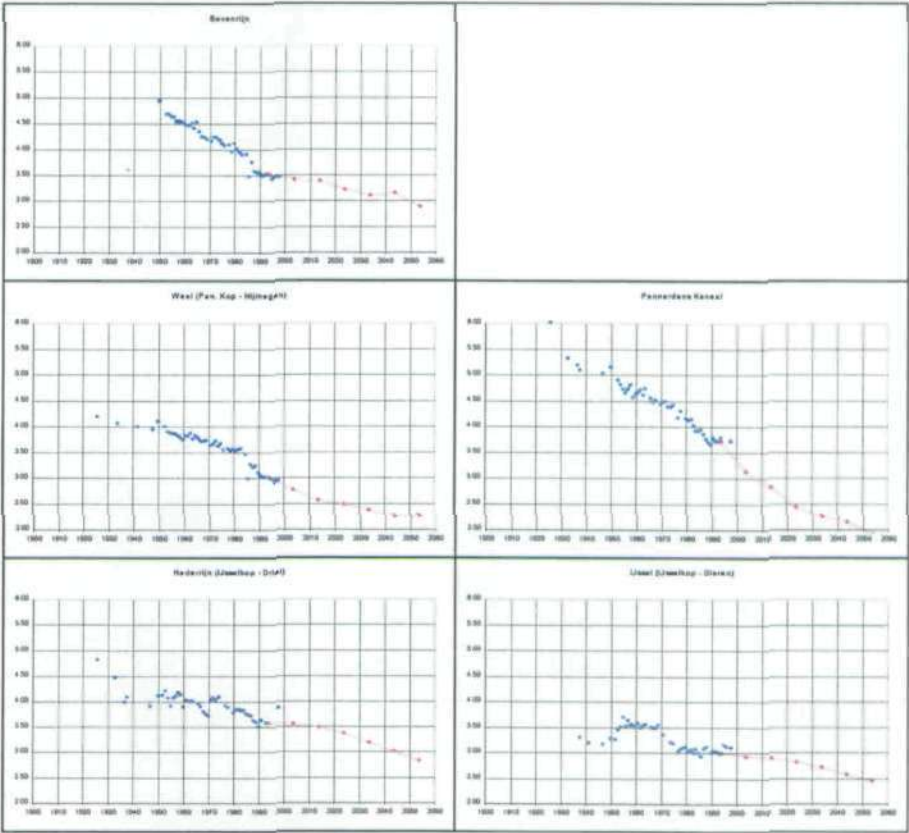
Met het herijkte model is vervolgens onderzocht wat het effect is op de afvoerverdeling bij OLR van:

- De reeds uitgevoerde vaste laag bij Nijmegen en de bodemkribben bij Erlecom.
- De geplande bodemschermen bij Haalderen en Hulhuizen.

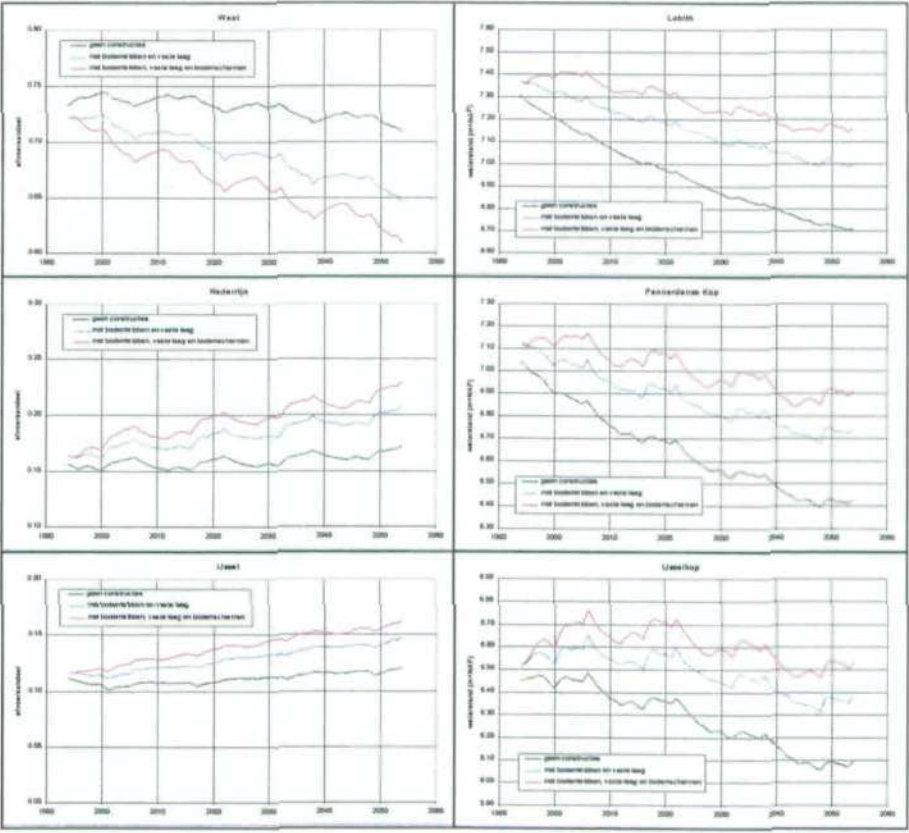
Deze constructies zijn aan het herijkte model toegevoegd. De bodemschermen zijn in Sobek als vaste laag geschematiseerd, maar in tegenstelling tot (echte) vaste lagen of bodemkribben wordt de hydraulische ruwheid niet verhoogd. Op grond van de theorie in (Odgaard *et al.*, 1990) neemt de C-waarde van het zomerbed door de bodemschermen weliswaar af, maar slechts met 4%. De afname van de Waalafvoer wordt dan ook alleen veroorzaakt door verminderde bodemdaling ter plaatse van de bodemschermen, en niet door de toegenomen ruwheid. Het resultaat op de afvoerverdeling en de OLR is gegeven in Figuur 12. De constructies zorgen voor minder afvoer via de Waal, maar dankzij de afgeremde bodemdaling en de grotere hydraulische weerstand van de vaste laag en de bodemkribben wel tot een hogere OLR in vergelijking met de situatie zonder constructies. Het berekende verschil in Waalafvoer met en zonder constructies komt qua orde van grootte overeen met (Douben, 1997).



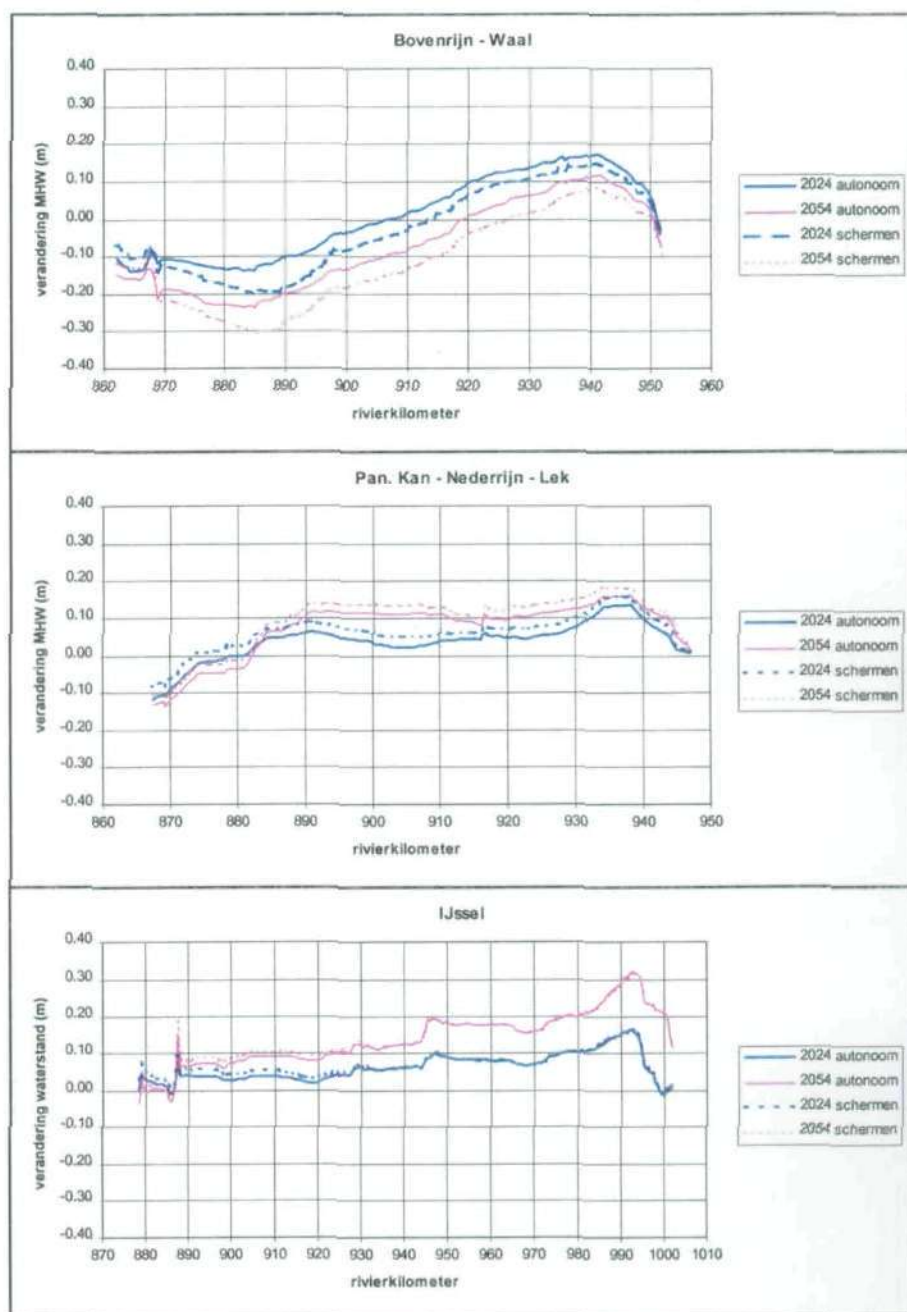
Figuur 11 Prognose bodemontwikkeling na aanvullende ijking.



Figuur 12 Effecten van constructies op de afvoerdeling en de OLR.



Figuur 13 Ontwikkeling MHW autonoom en met bodemschermen.



De autonome bodemontwikkeling van de Rijntakken en de ingrepen die gepleegd worden hebben hun effect op de Maatgevende Hoogwaterstanden (MHW). In Figuur 13 is met het herijkte Sobekmodel dit effect berekend in 2024 en 2054, voor de situatie zonder en met bodemschermen in de bochten bij Hulhuizen en Haalderen. Aan de benedenloop van de Waal en de IJssel is een flinke toename te zien, maar dit wordt veroorzaakt doordat in de berekeningen het onderhoudsbaggerwerk dat hier plaatsvindt niet is meegenomen. Met het baggerwerk wordt de vaargeul op diepte gehouden, hetgeen er tevens voor zorgt dat er geen toename van de MHW is. De bodemschermen remmen de bodemdaling in de Waalbochten af, waardoor de Waal minder water krijgt, niet alleen bij OLR (Figuur 12) maar ook bij MHW. De veranderingen in MHW-afvoer zijn aangegeven in Tabel 2. De hier

gepresenteerde wijzigingen in waterstanden en afvoerverdeling bij MHW zijn anders dan in (Schropp, 1999). Dit onderzoek is nog uitgevoerd met het niet-herijkte model, waarin de Waalafvoer in de toekomst toenam.

Tabel 2    Wijziging afvoerverdeling  
MHW door bodemontwikkeling  
(m<sup>3</sup>/s).

riviertak	autonoom		met bodemschermen	
	2024	2054	2024	2054
Waal	-102	-236	-165	-304
Nederrijn	46	108	79	144
IJssel	56	128	86	161

Discussie

Het in deze paragraaf gepresenteerde herijkte Sobekmodel geeft betere resultaten dan het oorspronkelijke model. Niettemin dient in het oog te worden gehouden dat ook nu nog het Sobekmodel slechts over een korte periode en op een beperkt aantal parameters is geijkt. Een uitvoeriger ijking over een langere periode is nodig om betrouwbaarder uitspraken te kunnen doen over trends in bodemligging en afvoerverdeling, maar zelfs dan blijven onzekerheden over de toekomstige bodemligging bestaan. Een grote tekortkoming bij ijking is en blijft de gebrekkige registratie van de hoeveelheden zand die in het verleden uit het zomerbed zijn gebaggerd. De tot nu toe gebouwde morfologische modellen van de Rijntakken laten voor de toekomst allemaal wel bodemdaling zien, maar de trends in de afvoerverdeling stemmen niet altijd overeen. In (Haskoning, 1990) wordt tot 2038 een gestage toename van de Waalafvoer berekend (bij 2500 m<sup>3</sup>/s), in (Meijer *et. al.*, 1994) daarentegen is de Waalafvoer bij OLR in 2050 afgenomen. Bovendien kunnen fluctuaties op korte termijn het zicht op de langjarige trend in de afvoerverdeling vertroebelen. Zo wordt in (Douben, 1997) geconstateerd dat de Waalafvoer tussen 1990 en 1996 is toegenomen, tegen de langjarige trend in. Kennelijk is hier sprake van een tijdelijke toename zoals er in het verleden wel meer zijn geweest, zie Figuur 3. De conclusie is dat zelfs met een zo goed mogelijk geijkt morfologisch model het resultaat onzeker blijft.

2.3 Gevoeligheidsanalyse

De toekomstige afvoerverdeling volgens Sobek is het resultaat van morfologische berekeningen. Omdat in een 1D-model morfologische processen sterk geschematiseerd worden weergegeven, zal ook het resultaat met een zekere marge zijn omgeven. Om inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de voorspelde trends, is met het herijkte Sobekmodel een gevoeligheidsonderzoek uitgevoerd naar enkele parameters die sterk bepalend zijn voor de morfologische processen, te weten:

- Het afvoerloop bij Lobith.
- De jaarlijkse sedimentvracht bij Lobith.
- De parameters in de gebruikte zandtransportformule.
- De verdelingsfunctie van sediment als functie van de afvoerverdeling op de beide splitsingspunten.

De redenen om voor deze parameters te kiezen zijn de volgende. Bij morfologische voorspellingen is het toekomstige afvoerloop per definitie niet bekend. Voor de morfologische ontwikkeling is het echter van belang of we te maken hebben met natte of droge jaren. Voorts zijn de van bovenstrooms aangevoerde hoeveelheid sediment en de grootte van het transport op de



takken slechts met een marge van enkele tientallen procenten bekend. En tenslotte moet in tegenstelling tot een waterbewegingsmodel in een (1D-) morfologisch model een formulering worden opgegeven voor de verdeling van sediment over splitsingspunten van rivieren. Ook over deze verdeling bestaat een grote mate van onzekerheid.

#### **Afvoerverloop Lobith**

Omdat toekomstige afvoeren bij Lobith niet bekend zijn, wordt in het Sobekmodel gebruik gemaakt van de afvoerreeks 1959-1974. Deze reeks bevat een droge, een natte en een gemiddelde periode, en wordt daarom representatief geacht voor het gemiddelde regime van de Rijn. Deze 16-jarige reeks wordt zo vaak als nodig herhaald, en bij nadere beschouwing is in de figuren met de toekomstige afvoerdeling (zie bv. Figuur 9) dan ook een 16-jarige periode te herkennen. Om het effect het regime in beeld te brengen, zijn uit de afvoerreeks van Lobith over de periode 1901-1999 de 10-jarige periode met de laagste gemiddelde afvoer (1942-1951, gemiddeld  $1916 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en de 10-jarige periode met de hoogste gemiddelde afvoer (1979-1988, gemiddeld  $2622 \text{ m}^3/\text{s}$ ) geselecteerd, zie de voor de selectie van de perioden (Van Vuuren, 2000). Deze reeks is zo vaak als nodig herhaald, en als randvoorwaarde opgelegd aan het Sobekmodel. Omdat de sedimentrandvoorwaarde is uitgedrukt als functie van de afvoer, verandert deze automatisch mee. Uit de resultaten in Figuur 24 (bijlage 1) blijkt dat de afvoerdeling en de OLR voor het gemiddelde 16-jarige regime inliggen tussen die van het natte en het droge regime. Ondanks de bandbreedte zijn de trends in de afvoerdeling hetzelfde als in de referentie (dalend voor de Waal, stijgend voor de Nederrijn en de IJssel). Bij een andere keuze voor het regime zullen de trends in grootte dan ook iets afwijken, maar wel dezelfde richting hebben. Wel gaan voor het natte regime de morfologische ontwikkelingen wat sneller, resulterend sterkere afname van de Waalafvoer en de OLR. Voor het droge regime geldt het omgekeerde.

#### **De jaarlijkse sedimentvracht bij Lobith**

In Sobek wordt de sedimentvracht bij Lobith opgegeven als functie van de afvoer, en bij het gehanteerde regime bedraagt de gemiddelde vracht  $400.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Deze waarde komt overeen met metingen, maar daarbij geldt wel een aanzienlijke marge. In Figuur 25 (bijlage 1) is het binnenkomende transport met 50% verkleind en vergroot.

Vergroten van het transport versterkt de trends in de afvoerdeling, en leidt tot een toename van de OLR bij Lobith, de Pannerdense Kop en de IJsselkop. Verkleinen van het transport heeft het omgekeerde effect. Met name het effect op de OLR is aanzienlijk, omdat de transportcapaciteit op de takken niet is aangepast aan het veranderde aanbod. Dit leidt tot aanzanding bij een verhoogd aanbod, en tot uitschuring bij een verlaagd aanbod. Pas na 6 jaar komt de sedimentatie- of erosiegolf die het gevolg is van het veranderde sedimentaanbod bij Lobith bij de Pannerdense Kop aan, en pas vanaf dat moment is, via een veranderde afvoerdeling, een effect merkbaar op de overige takken.

#### **De gebruikte transportformule in Sobek**

In het Sobekmodel wordt de zgn. 'user defined'-formule gebruikt voor de beschrijving van het sedimenttransport, maar er zijn andere formules mogelijk. In Figuur 26 (bijlage 1) is het resultaat van de Engelund-Hansenformule en de Van Rijnformule te zien. Voor beide formules zijn de calibratiefactoren op 1 gesteld.



Beide geven een stevige daling van de bodem, en dus van de OLR te zien, resulterend in een crash van de berekening na ca. 10 jaar. Een succesvol gebruik van beide formules is wel mogelijk, maar dan alleen bij calibratiefactoren veel kleiner dan 1, en de precieze grootte moet door ijking bepaald worden. Omdat bij de 'user defined'-formule in het herijkte Sobekmodel voor een aantal takken de calibratiefactoren ook nogal afwijken van 1, kan op grond daarvan geen voorkeur worden uitgesproken voor de ene of de andere formule. De keuze valt op de 'user defined'-formule omdat deze meer vrijheidsgraden heeft, wat van groot praktisch voordeel is bij de ijking.

### De calibratiefactor in de transportformule

Zoals uit het vorige punt al bleek, wordt de morfologische ontwikkeling in hoge mate worden bepaald door de grootte van de calibratiefactor in de transportformule. Deze factor kan per tak ingesteld worden en is idealiter gelijk aan 1. In het gebruikte Sobekmodel varieert de calibratiefactor tussen 0.9 (Waal) en 1.5 (Pannerdens Kanaal, Nederrijn en IJssel), zie de laatste kolom van Tabel 1. Om de grootte van de calibratiefactor wat in perspectief te plaatsen, zijn in Tabel 3 de factoren samengevat die door diverse modelleers zijn gebruikt. De eerste regel van de tabel heeft betrekking op een morfologisch model van de Rijntakken, gemaakt binnen het pakket RIVMOR (Boers, 1991).

**Tabel 3** Calibratiefactoren in verschillende modellen.

naam	model	formule	Bovenrijn	Waal	Pan. Kan.	Nederrijn	IJssel
Boers	RIVMOR	E.-Hansen	1.33	0.33	1.0	0.5	0.5
Wolters	Sobek	user-def.	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0
Assinck	Sobek	user-def.	1.0	0.6	1.1	1.0	1.0
Sloff	Sobek	user-def.	1.4	0.9	1.2	1.3	1.0

Om het effect van de calibratiefactor te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd waarin per tak de calibratiefactor met 0.5 is verhoogd en verlaagd. Per berekening zijn de calibratiefactoren van de overige takken ongemoeid gelaten. Tot slot is een berekening uitgevoerd waarin de calibratiefactoren van alle takken op 1.0 resp. 2.0 zijn gezet. De resultaten voor de afvoerverdeling staan in Figuur 27 t/m Figuur 32 (bijlage 1).

De calibratiefactor voor de Bovenrijn is, via de bodemligging, eigenlijk alleen van invloed op de OLR bij Lobith. De factor voor de Waal daarentegen blijkt zeer sturend te zijn voor de afvoerverdeling en de OLR. Voor de overige takken geldt dat het veranderen van de calibratiefactor vooral van invloed is op de tak zelf, en veel minder op de andere takken. Het resultaat van een calibratiefactor van 1.0 op alle takken wijkt nauwelijks af het resultaat met de set calibratiefactoren uit de referentie, waarschijnlijk omdat de factor van de Waal, de belangrijkste tak, al 0.9 bedraagt en dus niet veel afwijkt van 1.0. Een calibratiefactor van 2.0 voor alle takken geeft echter wel een afwijkend resultaat. De transportcapaciteit op de takken is een stuk groter dan in de referentie, zonder dat het bovenstroomse sedimentaanbod evenredig is verhoogd. Dit leidt tot aanzienlijke bodemdaling, en dus tot daling van de OLR.

### De verdeling van sediment over de splitsingspunten

Tot slot wordt gekeken naar de verdeling van het sediment over de beide splitsingspunten. De verdeling is in Sobek gedefinieerd als een functie van de afvoer:

$$\frac{S_{Waal}}{S_{Pan.Kan.}} = \alpha_{Pan.Kop} \cdot \frac{Q_{Waal}}{Q_{Pan.Kan.}}$$

$$\frac{S_{Nederrijn}}{S_{IJssel}} = \alpha_{IJsselkop} \cdot \frac{Q_{Nederrijn}}{Q_{IJssel}}$$

Omdat de afvoerverhouding tussen de takken slechts binnen nauwe marges varieert, zelfs bij veranderingen in bodemligging, is bij een constante  $\alpha$  ook de verhouding in de sedimentverdeling over langere periode nagenoeg constant. In de referentieberekening staan de verdelingsfactoren voor de Pannerdense Kop en de IJsselkop op resp. 4.0 en 1.5, resulterend in een verdeling van 90%/10% op de Pannerdense Kop, en 66%/34% op de IJsselkop. Voor de Pannerdense Kop wordt deze verhouding ondersteund door metingen, zie (Wilbers, 1999). Tijdens een meetcampagne tijdens het hoogwater van november 1998 is een verhouding in de verdeling van het bodemtransport gevonden van 88% Waal / 12% Pannerdens Kanaal.

In Figuur 33 en Figuur 34 (bijlage 1) is te zien wat het effect is als de verdelingsfactoren  $\alpha$  worden verhoogd c.q. verlaagd zodanig dat de verdeling met plus of min 5% verandert. Meer sediment naar één tak zorgt via een sterkere aanzanding voor een kleiner afvoeraandeel op die tak. Bij een lineaire verdelingsfunctie als hierboven is dit een zichzelf versterkend proces van meer aanzanding, daardoor minder afvoer, daardoor nog meer aanzanding, etc. Voor de Rijntakken met hun morfologische tijdschalen van eeuwen is dit echter een zeer traag proces, waardoor het snel versluierd wordt door ingrepen en processen op korte termijn. Uit de figuren blijkt dat wijzigingen in de sedimentverdeling over de splitsingspunten nauwelijks van invloed zijn op de OLR. Kennelijk wordt de lagere waterstand als gevolg van verminderde afvoer gecompenseerd door versterkte aanzanding, en vice versa. Omdat er nauwelijks effect is op de waterstanden, is een gewijzigde sedimentverdeling op de IJsselkop dan ook niet van invloed op de afvoer via de Waal.



## 3 Mogelijke sturingsmaatregelen en hun effecten

### 3.1 Mogelijke maatregelen

In dit hoofdstuk wordt onderzocht met welke maatregelen de afvoerverdeling in het lage afvoerbereik is te sturen, en wat voor elk van deze maatregelen het regelbereik is. Uitgangspunt bij het nemen van maatregelen is, dat de trend in de afvoerverdeling, zoals die in hoofdstuk 2 is beschreven, tot staan moet worden gebracht of dient te worden gekeerd. Deze trend is een afnemende Waalafvoer, een gelijkblijvende Nederrijnafvoer, en een toenemende IJsselafvoer. De volgende maatregelen zijn onderzocht:

- Zand baggeren in de ene tak en storten in de andere.
- Het aanpassen van kriblengtes en kribhoogtes.
- Het vergroten van de ruwheid op één of meer takken (Pannerdens Kanaal en/of IJssel).
- Het aanpassen van het stuwprogramma van stuw Driel.

De wijzigingen in de afvoerverdeling zijn het gevolg van veranderingen in de bodemligging. Om de afvoerverdeling te kunnen sturen moeten de maatregelen dus effect hebben op de morfologie. Voorts moet een maatregel om op korte termijn effectief te zijn, in de directe omgeving van de splitsingspunten worden uitgevoerd. Bovenstaande maatregelen voldoen aan deze criteria.

### 3.2 Hydraulische en morfologische effecten

In deze paragraaf wordt beschreven wat het effect is van bovenstaande maatregelen op de waterbeweging en de bodemligging. In alle onderstaande berekeningen is de situatie met bodemkribben en vaste laag, maar zonder de bodemschermen, als referentie gehanteerd.

#### Baggeren en storten

Een belangrijke reden voor de toekomstige afname van de Waalafvoer is dat de bodemdaling op het Pannerdens Kanaal relatief sterker is dan op de Waal, mede als gevolg van aangelegde constructies in de Waalbochten. Om dit tegen te gaan kan overwogen worden om:

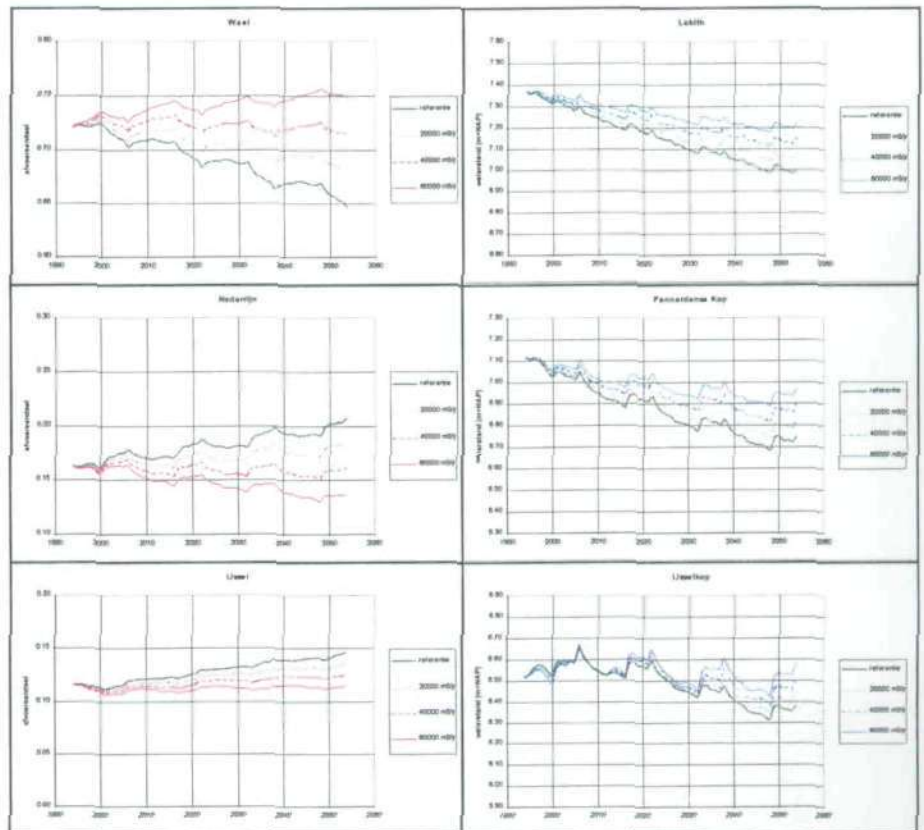
- Zand te storten in het Pannerdens Kanaal opdat de bodemdaling hier gelijke tred houdt met die op de Waal (Figuur 14).
- Zand te storten in de Bovenrijn, zodat de bodemdaling op zowel de Waal als het Pannerdens Kanaal trager verloopt (Figuur 15).
- Zand te baggeren uit de Waalbochten en dit te storten in het Pannerdens Kanaal, zodat de Waal meer afvoer trekt en het Pannerdens Kanaal minder (Figuur 16).

Het effect van deze scenario's op de afvoerverdeling en waterstanden is uitgezet bij verschillende baggervolumina (20.000, 40.000 en 60.000 m<sup>3</sup>/jaar). Baggeren c.q. storten vindt plaats over een traject van 5 km (Bovenrijn) of 10 km (Waal en Pannerdens Kanaal). Storten van 40.000 m<sup>3</sup> zand per jaar op het Pannerdens Kanaal heeft een stabiliserend effect op de afvoerverdeling, waarbij het te storten zand eventueel uit de Waalbochten afkomstig kan zijn. De



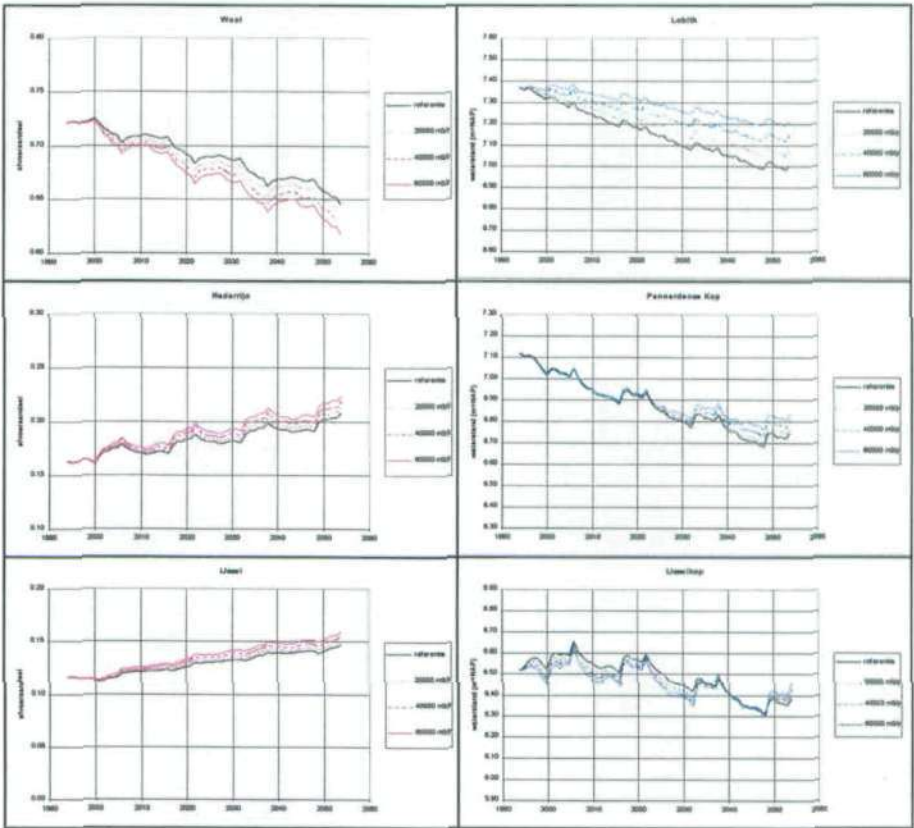
bodemdaling, en dus de daling van de OLR, wordt door het storten van zand in het Pannerdens Kanaal afgeremd. Sediment storten op de Bovenrijn remt de daling van de OLR ook af, maar versterkt de autonome trend in de afvoerverdeling. Het gestorte zand leidt tot een verhoogd transport op de Bovenrijn, en dus tot een groter aanbod op de Pannerdense Kop. Van dit surplus gaat 90% naar de Waal, waardoor de bodemdaling hier sterker wordt afgeremd dan op het Pannerdens Kanaal. Dit leidt ertoe dat het afvoeraandeel van de Waal kleiner wordt.

**Figuur 14** Zand storten in het Pannerdens Kanaal.

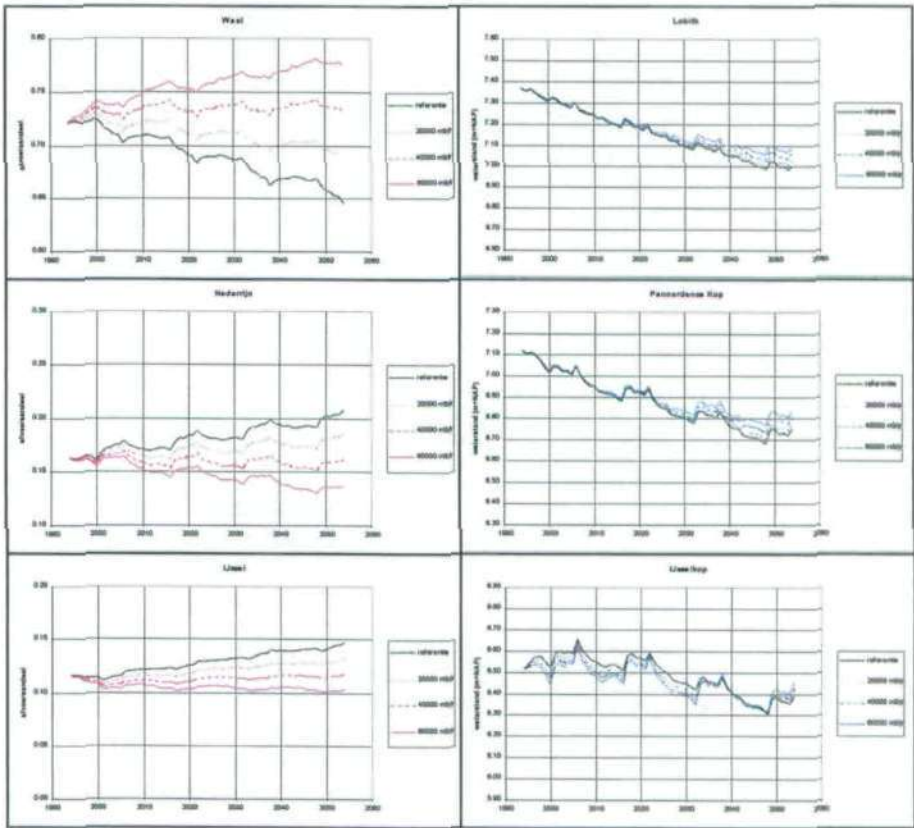


Baggeren en storten van zand is een zeer effectieve maatregel omdat hiermee een groot scala aan toekomstige afvoerverdelingen is te realiseren. Met een uitgekiende baggerstrategie moet het mogelijk zijn om de afvoerverdeling op alledrie de Rijntakken te stabiliseren.

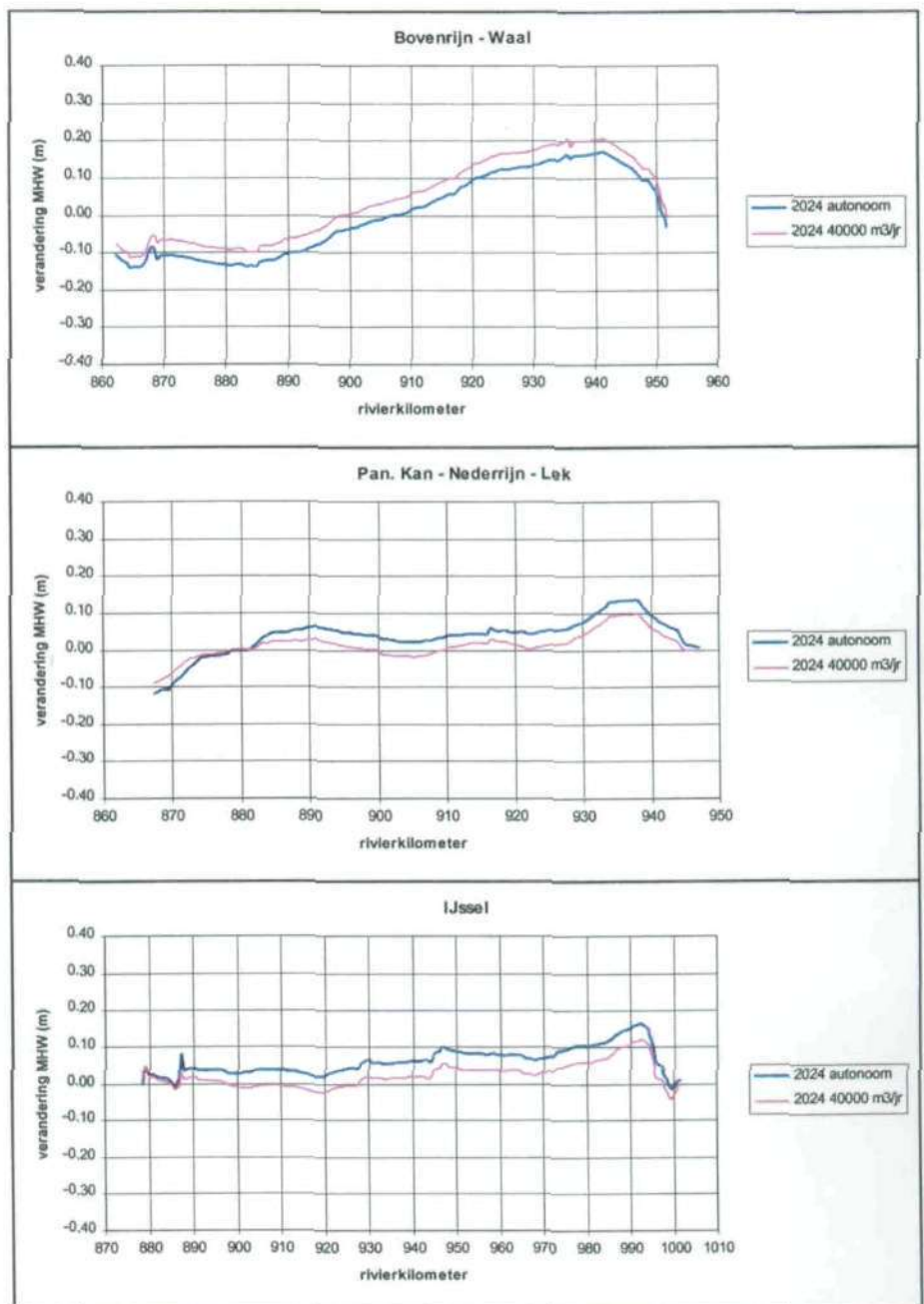
Figuur 15 Zand storten in de Bovenrij.



Figuur 16 Zand baggeren uit de Waalbochten en storten in het Pan. Kanaal.



**Figuur 17** Ontwikkeling MHW bij zand storten in het Pannerdens Kanaal.



Omdat baggeren en storten een veelbelovende maatregel lijkt, is voor één variant ook gekeken wat het effect op de MHW-standen is, te weten bij het storten van 40.000 m<sup>3</sup> zand per jaar in het Pannerdens Kanaal. In Figuur 14 is te zien dat bij deze maatregel de afvoerverdeling bij OLR in de tijd nagenoeg constant blijft. Er vindt nog wel bodemdaling plaats, want de waterstanden bij Lobith en de splitsingspunten dalen in de tijd. Het stabiliseren van de afvoerverdeling bij OLR door het storten van zand in het Pannerdens Kanaal betekent dat ook bij MHW de afvoerverdeling in de tijd minder verandert dan in de autonome ontwikkeling, zie Tabel 4. Dit betekent dat op de Waal de MHW-standen hoger zijn dan in de autonome ontwikkeling, en op de Nederrijn en IJssel over het algemeen lager, zie Figuur 17. De MHW-stand op het



Pannerdens Kanaal is hoger dan in de autonome ontwikkeling, omdat hier de bodem van het zomerbed hoger ligt als gevolg van de zandsuppletie.

Tabel 4 Wijziging afvoerverdeling bij MHW in 2024 (m³/s).

situatie	Waal	Nederrijn	IJssel
.....	.....	.....	.....
autonoom	-102	+46	+56
storten van 40.000 m³/jaar in Pan. Kan.	-10	-5	+15

In Figuur 17 is te zien dat aan de benedenlopen van drie Rijntakken de MHW-stand toeneemt. Dit komt echter doordat in de berekeningen het onderhoudsbaggerwerk niet is meegenomen. In werkelijkheid zal om nautische redenen het zomerbed hier uitgebaggerd worden, en zal er dus ook geen toename van de MHW-standen zijn.

Aanpassen van de kribben

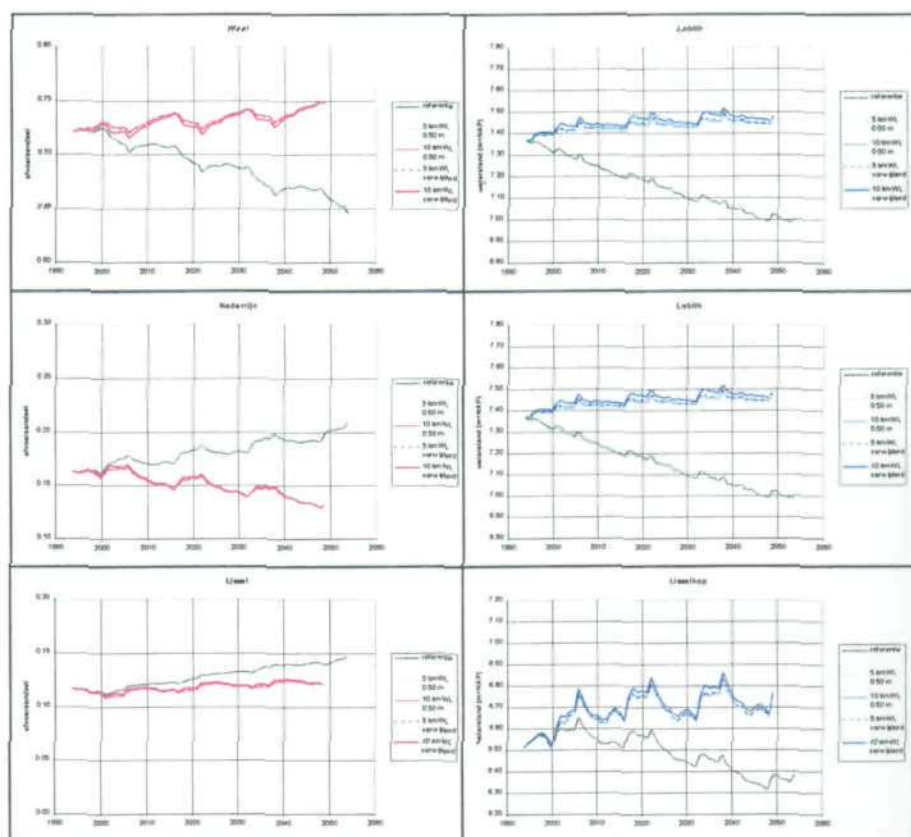
Het verlagen van de kribben zorgt door aanzanding voor een hogere (of minder lagere) bodemligging. Het effect van kribverlaging op de Waal of het Pannerdens Kanaal is aangegeven in resp. Figuur 18 en Figuur 19. De verlagingen zijn uitgevoerd over lengtes van 5 km en 10 km vanaf de Pannerdense Kop, en varieerden van een verlaging met 0,50 m tot het volledig verwijderen van de krib.

De lijnen die een kribverlaging van 0.50 m op het Pannerdens Kanaal weergeven, vallen in Figuur 19 niet op, omdat ze samen blijken te vallen met de referentie. Het verlagen met 0.50 m op de Waal heeft daarentegen hetzelfde effect als het volledig verwijderen van de kribben op de Waal. Ook het volledig verwijderen van de kribben op het Pannerdens Kanaal heeft nagenoeg hetzelfde effect als het verwijderen van de kribben op de Waal. Er is nauwelijks verschil in effect tussen het verlagen over 5 km of over 10 km. Omdat verwacht mag worden dat het verlagen van kribben een minder discontinu effect op de afvoerverdeling heeft, is het waarschijnlijk dat kribverlaging met het model niet goed doorgerekend kan worden. Een mogelijke oorzaak is het gebruikte afvoerregime, waarbij op het Pannerdens Kanaal zowel in de referentie als bij 0,50 m verlaging de kribben maar zelden overstroomd, en een kribverlaging dus geen morfologisch effect heeft. Dit biedt echter nog steeds geen verklaring voor de resultaten bij kribverlaging op de Waal.

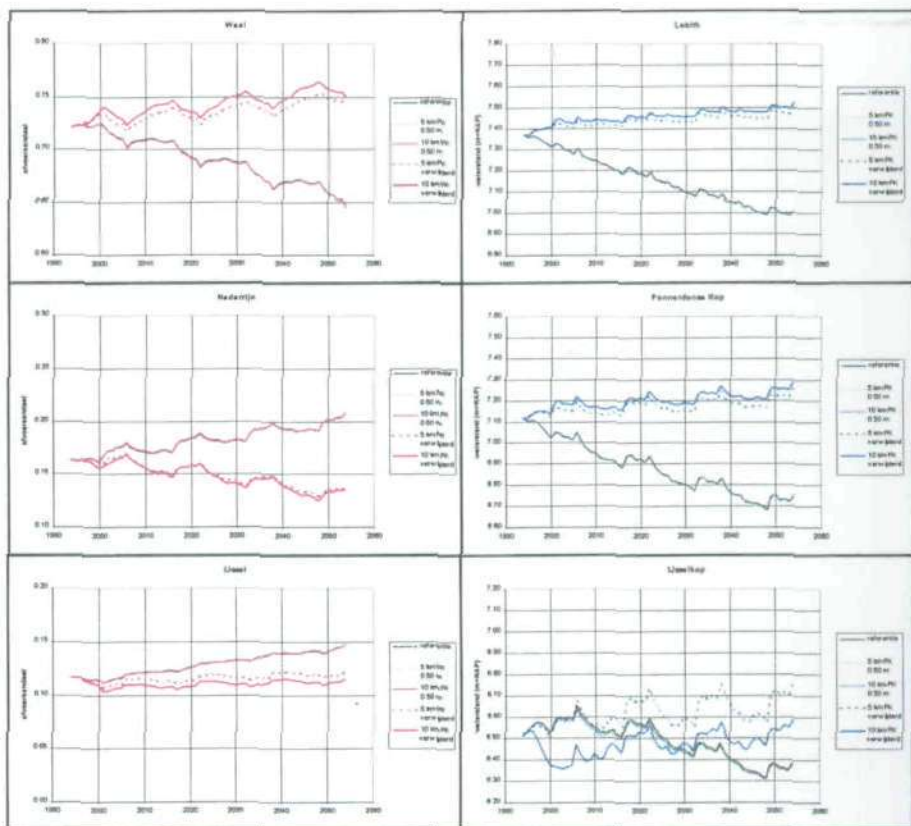
Het verlagen van kribben is als maatregel ook in het kader van de projecten 'Integrale Verkenning inrichting Rijntakken' (IVR) en 'Ruimte voor Rijntakken' (RvR) met Sobek doorgerekend. In (Kok et. al., 1996) zijn MHW-berekeningen uitgevoerd waarin de kribben met 0.5 en 1.0 m zijn verlaagd. Dit had een nagenoeg lineair effect op de MHW-standen, het morfologisch effect van kribverlaging is in IVR-kader echter niet onderzocht. Dit is wel gedaan in RvR-kader in (Assinck et. al., 1998). Hier zijn de kribben per traject, en voor het gehele studiegebied met 1.0 m of meer verlaagd, en is de verandering in MHW-stand en bodemligging bekeken in 2015 en 2050. De verandering in bodemligging bij integrale verlaging van de kribben met 1.0 m lag in de orde van 0.1 m, een realistische geachte waarde. Waarschijnlijk omdat geen kribverlagingen van minder dan 1.0 m zijn doorgerekend, hebben de hierboven geschetste problemen zich in de RvR-studie niet voorgedaan.

Het morfologisch doorrekenen van kribverlaging met Sobek is onder bepaalde omstandigheden, met name kleine verlagingen, kennelijk een probleem. Het is dan ook niet mogelijk om een betrouwbare uitspraak te doen over de effectiviteit van kribverlaging in relatie tot het bijsturen van de afvoerverdeling.

Figuur 18 Aanpassen kribhoogten Waal.



Figuur 19 Aanpassen kribhoogten Pannerdens Kanaal.

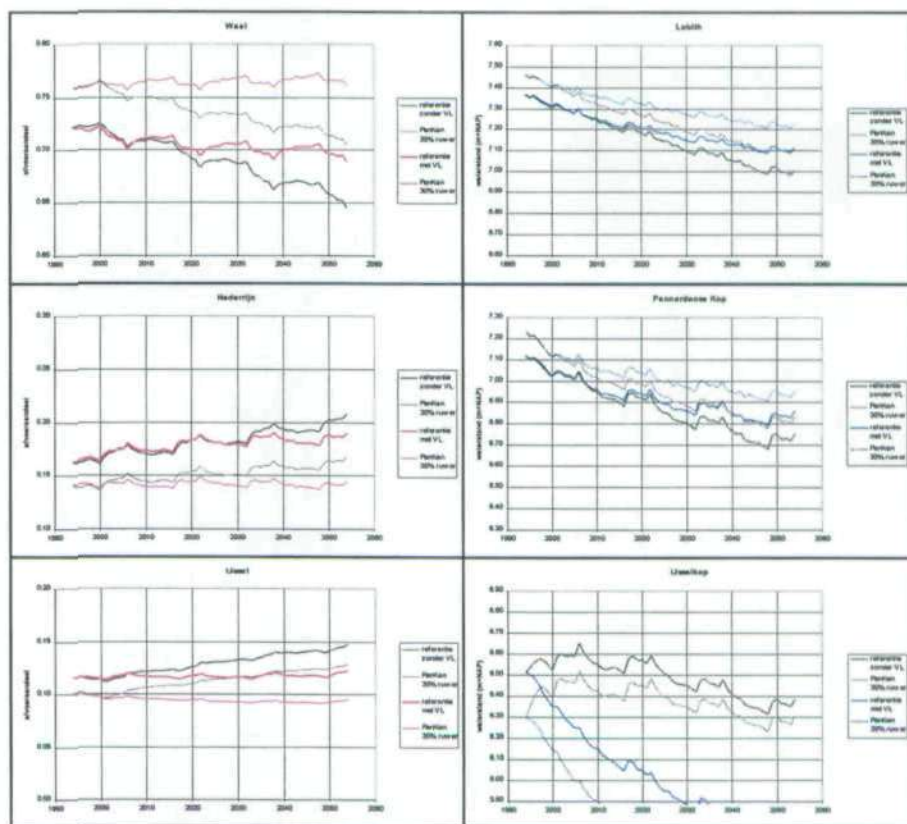




### Aanpassen van de ruwheid

Een mogelijkheid om de neergaande trend in de Waalafvoer te keren, is het aanbrengen van extra ruwheid op de bodem van het Pannerdens Kanaal. Dit zal waarschijnlijk uitgevoerd worden in de vorm van een vaste laag of bodemkribben, en daarom moet in Sobek naast het verlagen van de C-waarde ook een vaste laag worden geschematiseerd. In Figuur 20 is het gescheiden en het gecombineerde effect van een vaste laag en een lagere ruwheid uitgezet. Over de volledige lengte van het Pannerdens Kanaal (ca. 10 km) is in Sobek een vaste laag aangebracht al of niet in combinatie met 30% lagere C-waarde van het zomerbed. Een verlaging van de C-waarde met 30% komt ongeveer overeen met het aanbrengen van een vaste laag met een ruwheid als die van Nijmegen.

Figuur 20 Vergroten ruwheid Pannerdens Kanaal.



Er blijkt dat alleen een grotere ruwheid vooral initieel effect heeft, maar nauwelijks van invloed is op de morfologische ontwikkeling: in alle figuren lopen de lijnen met een lagere C-waarde nagenoeg parallel aan de hun referentie. Een vaste laag is wel van invloed op de morfologische ontwikkeling. De afvoerdivergentie is ermee te stabiliseren, en de daling van de OLR bij Lobith en de Pannerdse Kop wordt ermee afgeremd. Bij de IJsselkop is de daling echter veel sterker dan in de referentie, voornamelijk omdat bovenloop van zowel Nederrijn als IJssel uitschuurt. De verklaring hiervoor is dat de bodem van het Pannerdens Kanaal door de vaste laag niet meer kan dalen, en dat daardoor het zandtransport vanuit het Pannerdens Kanaal lager is. Dit probleem kan opgelost worden door zandsuppletie op de IJsselkop of vaste lagen in de Nederrijn en de IJssel. De eerste maatregel is in feite een variant op baggeren en

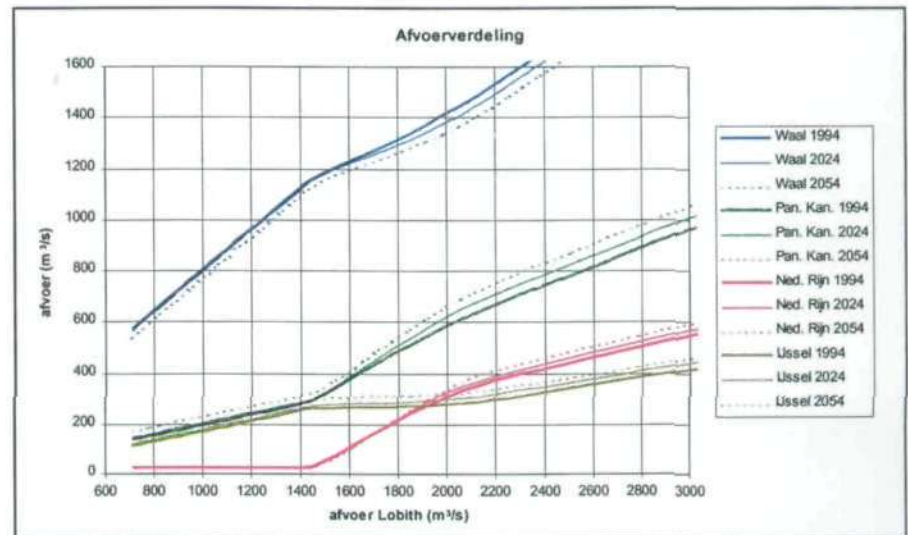


storten en maakt een vaste laag in het Pannerdens Kanaal overbodig, de tweede maatregel kost waarschijnlijk meer dan het oplevert.

#### Aanpassen van het stuwprogramma van stuw Driel

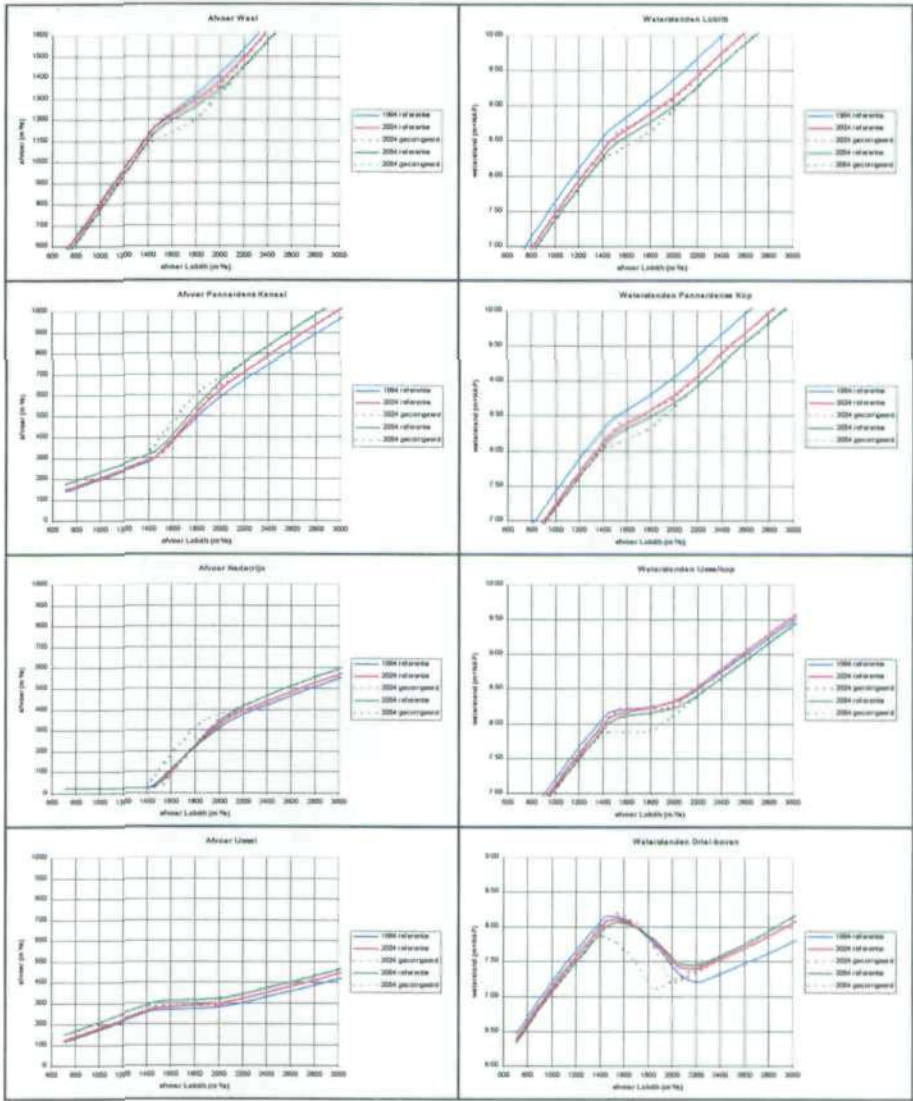
De uitgangspunten van het stuwprogramma S-285 zijn, dat de afvoer via de IJssel zo lang mogelijk op 285 m<sup>3</sup>/s wordt gehouden, maar dat de afvoer via de Nederrijn niet lager dan 25 m<sup>3</sup>/s mag worden. In Sobek geschiedt de aansturing van stuw Driel door middel van een tabel waarin drempelinstellingen staan gegeven als functie van de afvoer bij Lobith. Bij de huidige geometrie en bodemligging zorgt dit voor een redelijke reproductie van de afvoerverdeling volgens stuwprogramma S-285. Als gevolg van morfologische ontwikkelingen zal bij drempelaansturing op basis van de afvoer bij Lobith de afvoerverdeling over de Rijntakken in de tijd verlopen. In Figuur 21 is aangegeven hoe de gestuwde afvoerverdeling in 2024 en 2054 eruit ziet als voor de toekomst de huidige relatie tussen de afvoer bij Lobith en de drempelinstelling van stuw Driel zou worden gehandhaafd. Te zien is dat de gestuwde afvoer van de IJssel dan meer bedraagt dan de beoogde 285 m<sup>3</sup>/s.

**Figuur 21** Toekomstige afvoerverdeling bij ongewijzigde stuwinstellingen.



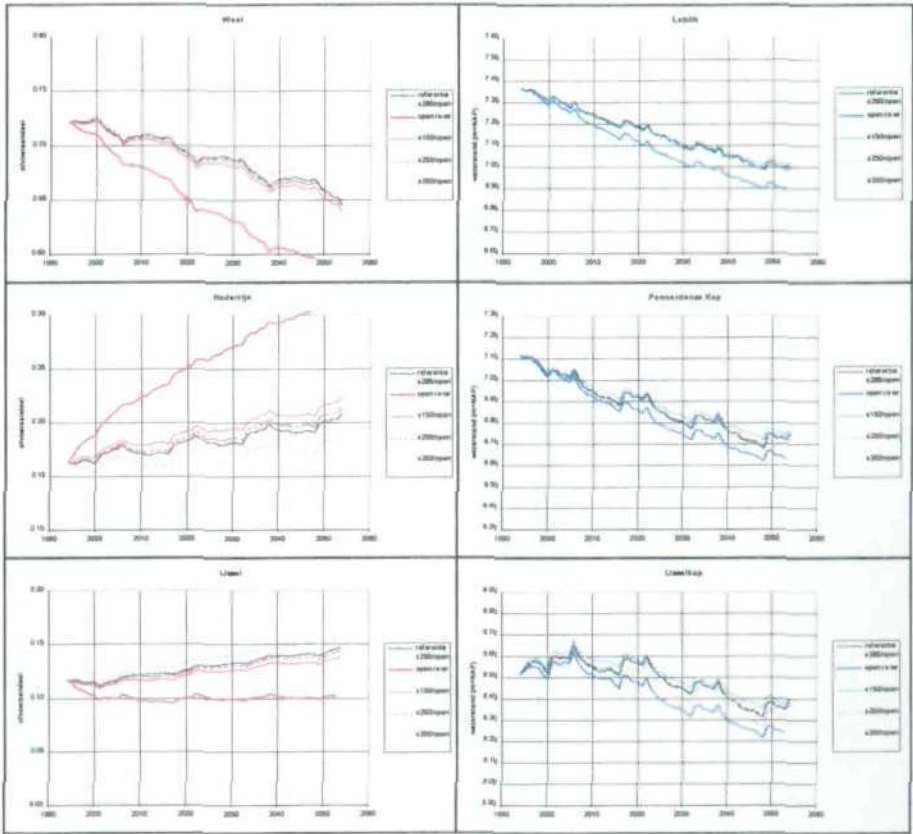
Op basis van de uitgangspunten van stuwprogramma S-285 (streefwaarde IJsselafvoer 285 m<sup>3</sup>/s, Nederrijnafvoer minimaal 25 m<sup>3</sup>/s) zijn bij de bodemligging van 2024 en 2054 nieuwe tabellen afgeleid met de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de drempelinstelling voor stuw Driel. De afvoerverdeling en waterstanden behorend bij deze gecorrigeerde stuwprogramma's zijn uitgezet in Figuur 22 (stippellijnen). In vergelijking met het ongecorrigeerde stuwprogramma blijkt de situatie in 2024 niet wezenlijk af te wijken van de referentie, voornamelijk omdat de verstoring in 2024 al niet groot was. In 2054 zijn de afwijkingen wel aanzienlijk. In gestuwde toestand moet de waterstand op de IJsselkop flink dalen om de IJsselafvoer niet boven 285 m<sup>3</sup>/s te laten uitkomen. Een lagere waterstand op de IJsselkop betekent dat nog meer water aan de Waal wordt onttrokken. Dit surplus moet via de Nederrijn afgevoerd worden, waardoor stuw Driel verder open moet en het gestuwde traject wordt bekort.

Figuur 22 Afvoerverdeling bij gecorrigeerd stuwprogramma.



Vervolgens is gekeken of met een ander stuwprogramma voor Driel de ontwikkeling in de afvoerverdeling is te sturen, zie Figuur 23. Analooq aan S-285 zijn de stuwprogramma's S-150, S-250 en S-350 genoemd. Het spoeldebiet is in alle gevallen op 25 m³/s gehouden. Ongeacht het gebruikte stuwprogramma bij de morfologische berekening, is de afvoerverdeling bij OLR wel steeds bij open rivier bepaald. Als extreme variant is bovendien de ontwikkeling in morfologie en afvoerverdeling doorgerekend voor de situatie 'open rivier'. Te zien is dat minder sterk stuwen (S-250, S-150 en open rivier) de trend in de afvoerverdeling versterkt, en dat sterker stuwen (S-350) de trend verzwakt. Dit echter onvoldoende om de Waalafvoer te stabiliseren.

Figuur 23 Alternatieve stuwprogramma's.





---

## 4 Conclusies en aanbevelingen

---

### 4.1 Conclusies

#### Autonome ontwikkeling

- Afgezien van de eerste decennia van de 20<sup>e</sup> eeuw wijzigt de afvoerverdeling bij open rivier in het lage bereik zich zodanig dat de Waal steeds minder afvoer krijgt, de Nederrijnafvoer gelijk blijft, en de IJsselafvoer toeneemt. De oorzaak hiervan is dat de bodem van het Pannerdens Kanaal sneller daalt ten opzichte van die van de Waal. Er zijn aanwijzingen dat vanaf ca. 1990 de bodemligging van de Rijntakken zich stabiliseert.
- Voor een aantal stations in het splitsingspuntengebied neemt de ongestuwde OLR al enkele tientallen jaren af met ca. 2.5 cm/jaar. Op grond van de registratie bij Lobith is het waarschijnlijk dat deze trend rond 1930 is ingezet.
- Om met Sobek voorspellingen te doen voor de toekomstige bodemligging en afvoerverdeling, bleek een herijking van het bestaande model noodzakelijk. Met name de verdeling van het sediment over de splitsingspunten en de calibratiefactoren voor de transportformule zijn daarbij van grote betekenis.
- De constructies in de Waalbochten versterken de trend in de afvoerverdeling: de Waal krijgt minder afvoer ten gunste van de Nederrijn en de IJssel. De constructies remmen de autonome bodemdaling af, en zorgen zo voor een minder snelle daling van de OLR bij Lobith, de Pannerdense Kop en de IJsselkop.
- De veranderingen in afvoerverdeling als gevolg van de constructies in de Waalbochten zijn niettemin gering: de prognose voor de komende 60 jaar bedraagt slechts enkele procenten verstoring.
- Het plaatsen van bodemschermen in de Waalbochten leidt ook bij MHW tot een lagere Waalafvoer. Op de Waal neemt de MHW af ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Op de Bovenrijn, het Pannerdens Kanaal, de Nederrijn en IJssel toe.
- Een analyse wijst uit dat de met Sobek voorspelde trends gevoelig zijn voor de sedimentvracht bij Lobith, de gebruikte transportformule, de calibratiefactoren voor de transportformule (met name de Waal), en de verdeling van sediment over de splitsingspunten. Minder gevoeligheid is er voor het gebruikte afvoerregime.

#### Sturingsmaatregelen

- Het storten van zand in het Pannerdens Kanaal, eventueel gebaggerd uit de bovenloop van de Waal, is een effectieve manier om de trend in de afvoerverdeling en de OLR bij te sturen. De suppletie dient ca. 40.000 m<sup>3</sup> per jaar te bedragen.
- Het storten van zand in de Bovenrijn versterkt de trend in de afvoerverdeling, maar remt wel de daling van de OLR af.
- Het bleek niet mogelijk om met Sobek het aanpassen van de kribhoogten op een betrouwbare manier door te rekenen. Een oordeel over de effectiviteit van deze maatregel kan dan ook niet gegeven worden.

- 
- Met het vergroten van de ruwheid van het Pannerdens Kanaal door middel van een vaste laag of bodemkribben, is het mogelijk om de trend in de afvoerverdeling bij te sturen. De OLR van de IJsselkop daalt hierdoor echter zeer sterk, zodat deze maatregel is af te raden.
  - Het aanpassen van het stuwprogramma van stuw Driel is vooral van invloed op de afvoerverdeling tussen Nederrijn en IJssel, maar nauwelijks op de Waalafvoer. Ook deze maatregel is daarom niet aan te bevelen.

#### 4.2 Aanbevelingen

- Zandsuppletie is een effectieve maatregel voor het sturen van de afvoerverdeling. Of het ook een *noodzakelijke* maatregel is kan op basis van alleen dit rapport niet gezegd worden, en vergt nader onderzoek, bijvoorbeeld in de vorm van een kostenvergelijking tussen niet en wel ingrijpen. Aandachtspunten bij een dergelijke studie zijn onder meer de kosten voor de binnenvaart bij afnemende Waalafvoer, schade aan constructies door de voortgaande bodemdaling van het Pannerdens Kanaal, ecologische gevolgen van zandsuppleties, het benutten van het Pannerdens Kanaal als stortlocatie van zand dat vrijkomt bij het op diepte baggeren van de Waal, de gewenste samenstelling van het te storten materiaal, de optimale stortlocatie, en de stortfrequentie.
- Ten aanzien van het modelinstrumentarium is een betere morfologische afregeling van de Sobekschematisatie van de Rijntakken noodzakelijk. Deze ijking dient te bestaan uit het reproduceren van gemeten trends in de *bodemligging en de afvoerverdeling*. Tevens dient onderzocht te worden waarom het met Sobek doorrekenen van het verlagen van kribben geen bevredigende resultaten geeft.

---

## Referenties

---

- Assinck, F.B.T., C.O.G. van Haselen en W. van de Langemheen (1998),  
'Ruimte voor Rijntakken. Screening van grootschalige maatregelen. Deel B: resultaten van de screening'. RWS/RIZA, werkdocument 98.181X.
- Boers, M. (1991),  
'Een nieuw morfologisch model voor de Nederlandse Rijntakken op basis van RIVMOR'. RWS/RIZA, nota 91.026.
- Douben, N. (1997),  
'Bodemkribben in de Waal bij Erlecom. Analyse van opstuwing en hydraulische bodemruwheid'. RWS/RIZA, nota 97.050.
- Haskoning (1990),  
'Autonome morfologische ontwikkeling van de Rijntakken. Deel 1: hoofdrapport'. Haskoning.
- Kok, M., N. Douben, J.M. van Noortwijk en W.Silva (1996),  
'Integrale verkenning inrichting Rijntakken. Veiligheid'. RIZA/WL/HKV, IVR-rapport nr. 12.
- Meijer D.G., R.B.H. Huyskens en K. Vermeer (1994),  
'Integrale verkenning inrichting Rijntakken. Rivierkundige aspecten: ruimte en tijd'. Waterloopkundig Laboratorium, IVR-rapport nr. 9.
- Odgaard, J. en Y. Wang (1991),  
'Sediment management with submerged vanes. I: Theory'. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 117, no. 3.
- Ploeger, B. (1992),  
'Bouwen aan de Rijn. Menselijke ingrepen op de Rijn en zijn takken'. Rijkswaterstaat, nota 53.
- Rijkswaterstaat (1985),  
'Tienjarig Overzicht der waterhoogten, afvoeren en watertemperaturen 1961-1970'. RWS/Directie Waterhuishouding en Waterbeweging.
- Rijkswaterstaat (1997),  
'Jaarboek monitoring Rijkswateren 1995. Kengetallen'. RWS/RIKZ en RWS/RIZA.
- Schropp, M.H.I. (1999),  
'Regelbereik afvoerverdeling Rijntakken. Een verkenning bij Maatgevend Hoogwater'. RWS/RIZA, rapport 99.022.
- Struijk, A.J. (1994),  
'Ontwikkelingen in de afvoerverdeling over de Rijntakken 1900-1991'. RWS/Directie Gelderland.



- 
- Veen, R. van der, U. Pakes, J. van Essen en L. Schutte (1997),  
'Calibratie Sobek-Rijntakken (versie 1996.0)'. RWS/RIZA, rapport 97.034.
- Visser, P.J. (in prep.),  
'Bodemontwikkeling Rijnsysteem. Een verkenning van omvang, oorzaken, gevolgen en mogelijke maatregelen'. RWS/Directie Oost-Nederland.
- Vuuren, W.E. van (2000),  
'99 jaar dagafvoeren Lobith. Jaarverlopen 1901-2000, frequentiekaracteristieken en langjarige variaties'. RWS/RIZA, werkdocument 2000.088X.
- Wilbers, A.W.E. (1999),  
'Bodemtransport en duinontwikkeling in de Rijntakken. Bodempeilingen hoogwater november 1998'. Netherlands Centre for Geo-ecological Research, rapport ICG 99/10.
- Wolters, A. (1997),  
'Morfologische rekenen met Rijntakkenmodel'. RWS/RIZA, memo 97-18, 17 december 1997.

---

# Bijlagen

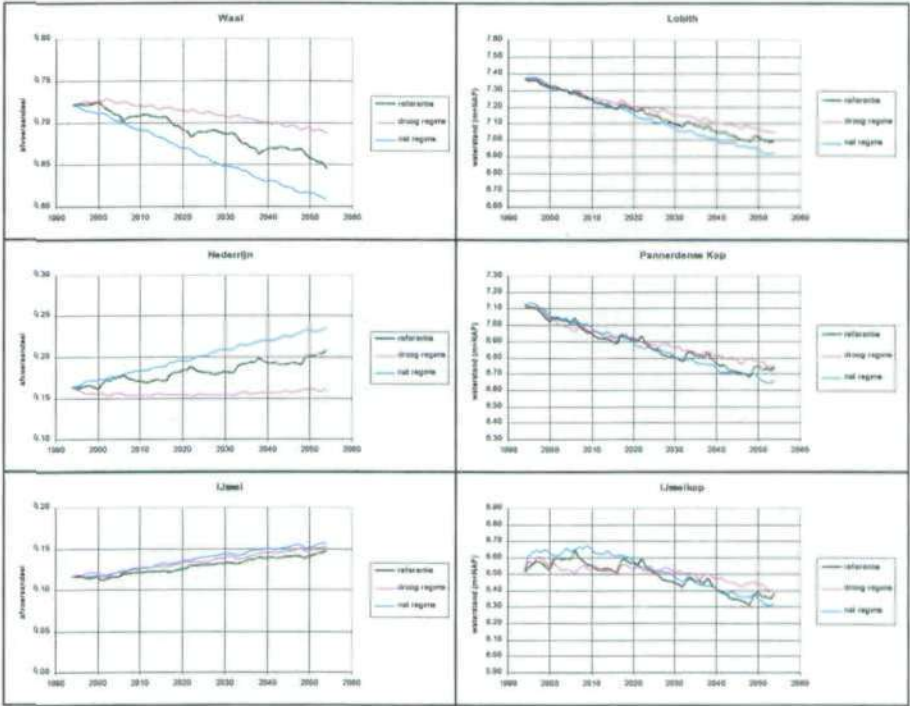
---



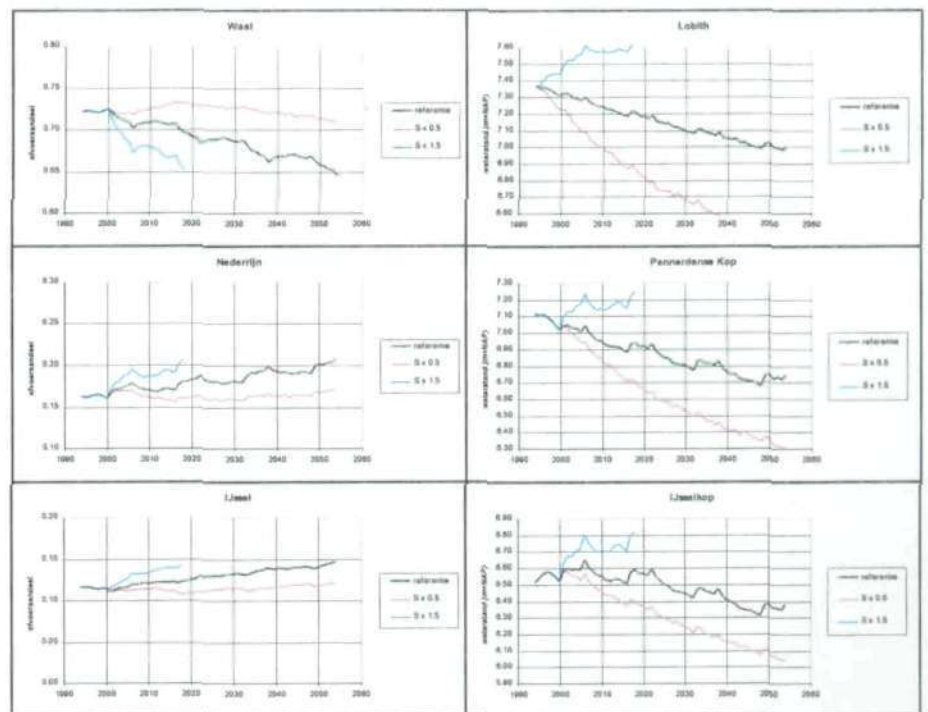


# 1 Figuren gevoeligheidsonderzoek

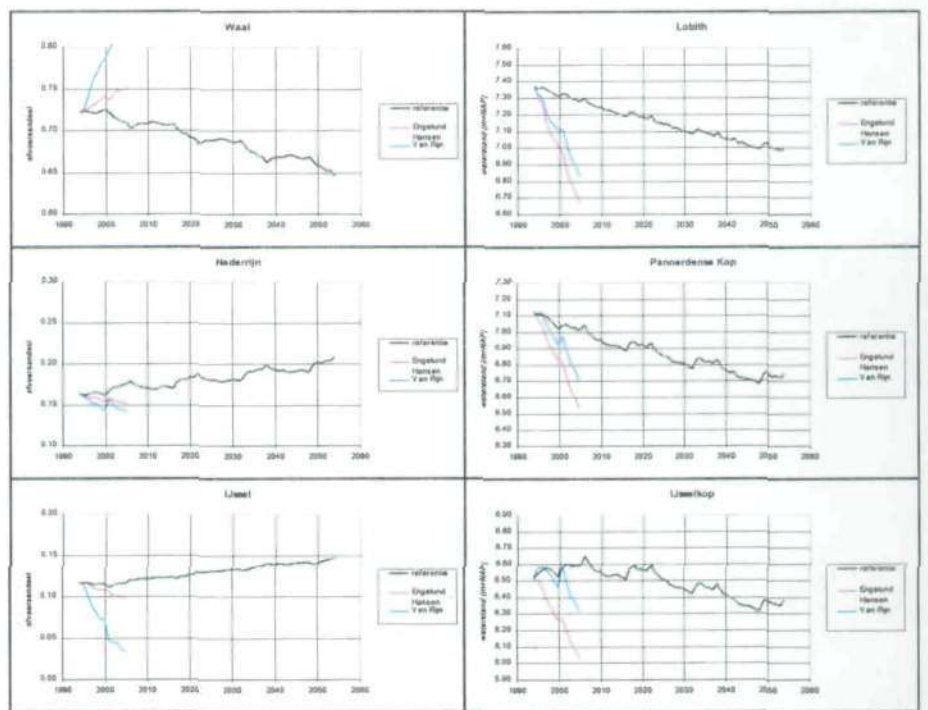
Figuur 24 Gevoeligheid gekozen afvoerregime.



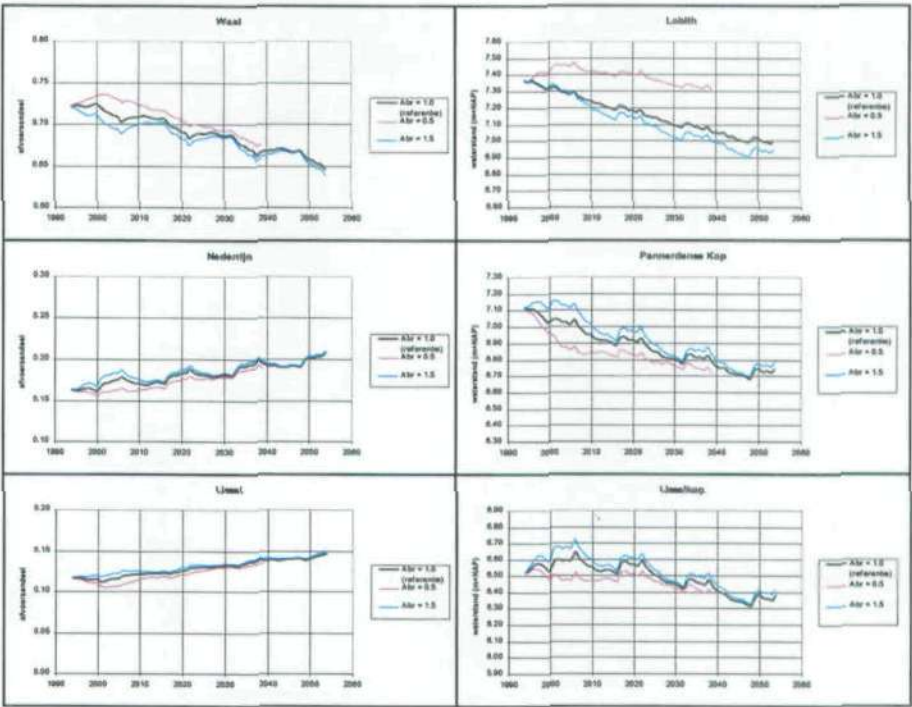
Figuur 25 Gevoeligheid jaarlijkse sedimentvracht te Lobith



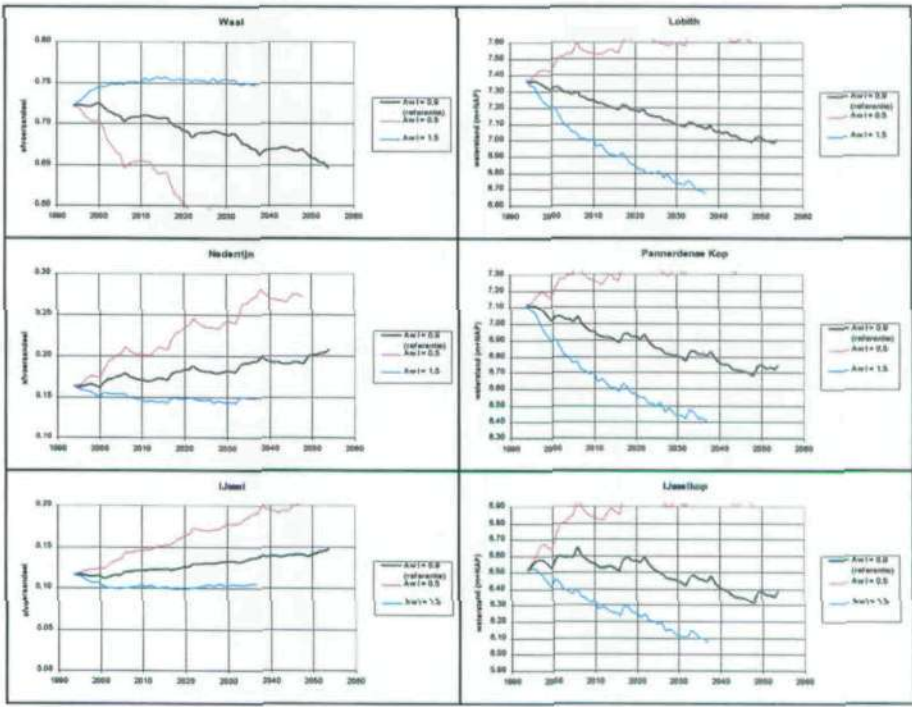
Figuur 26 Gevoeligheid gebruikte transportformule.



Figuur 27 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Bovenrijn.

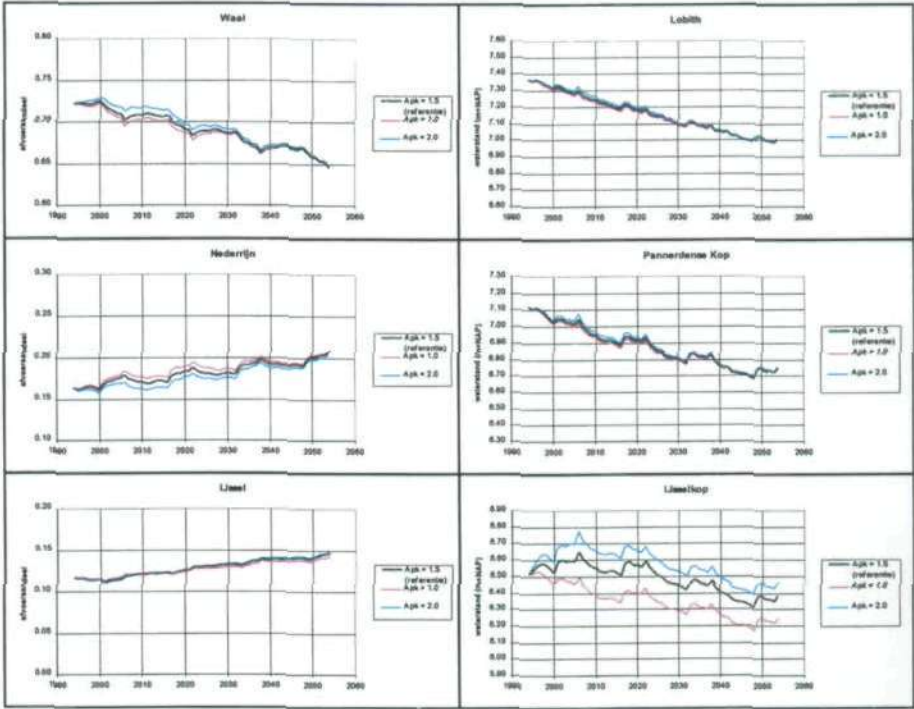


Figuur 28 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Waal.

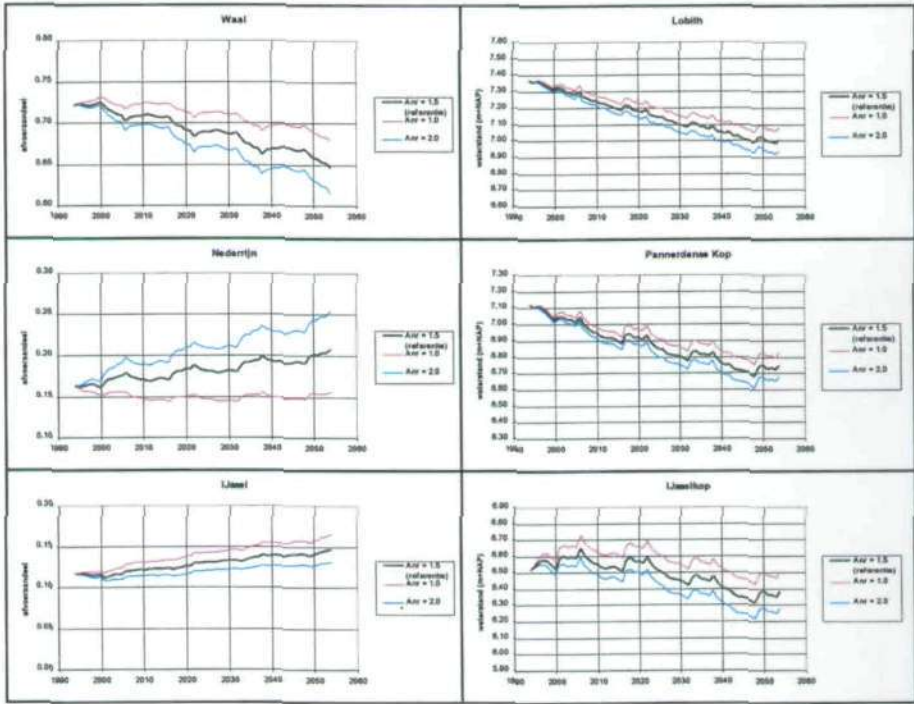




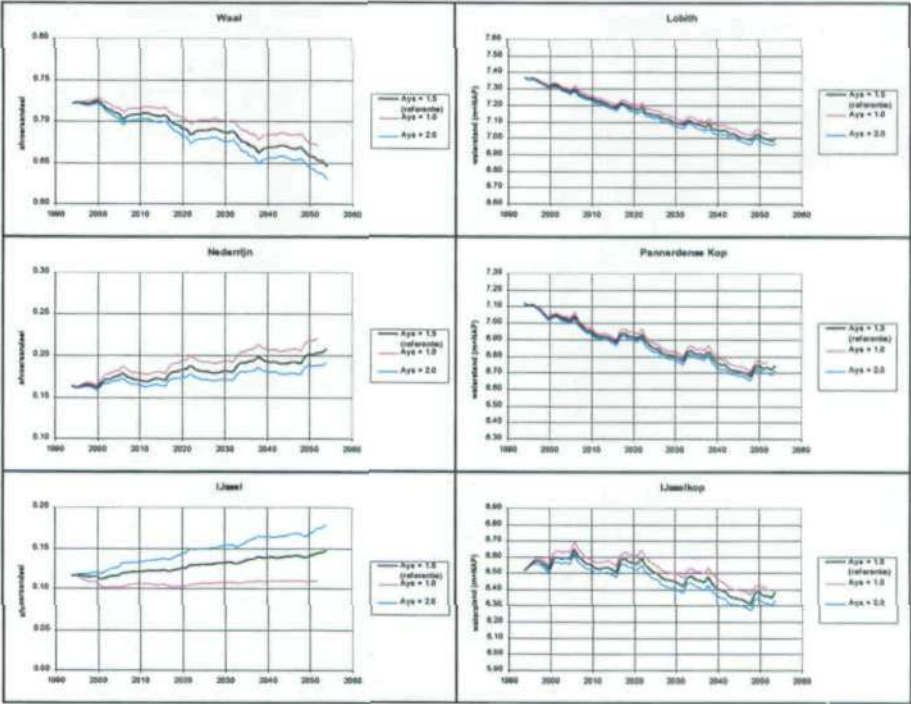
Figuur 29 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Pan. Kanaal.



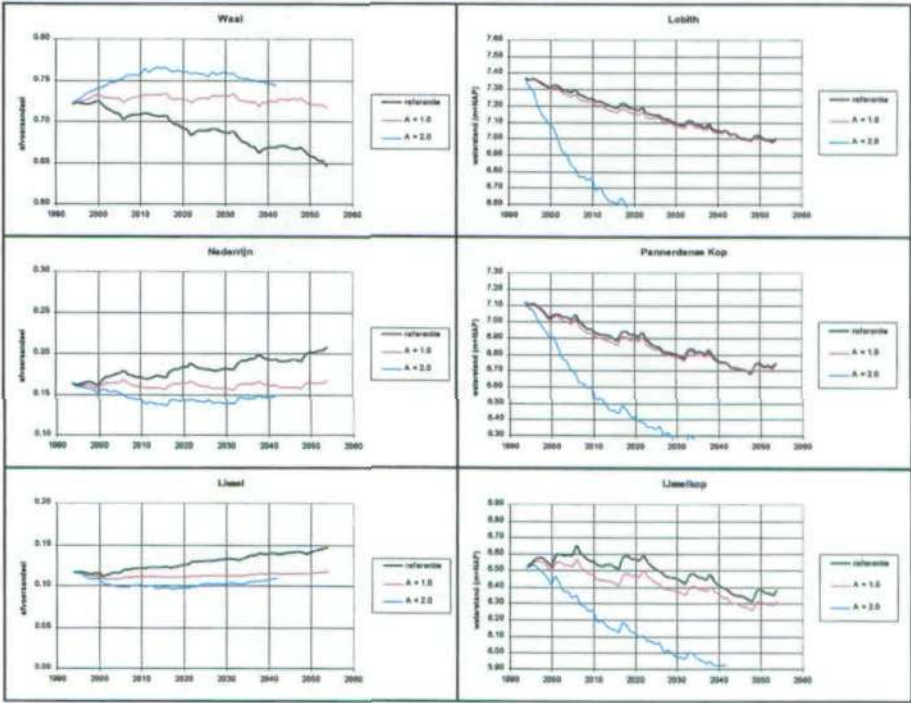
Figuur 30 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - Nederrijn.



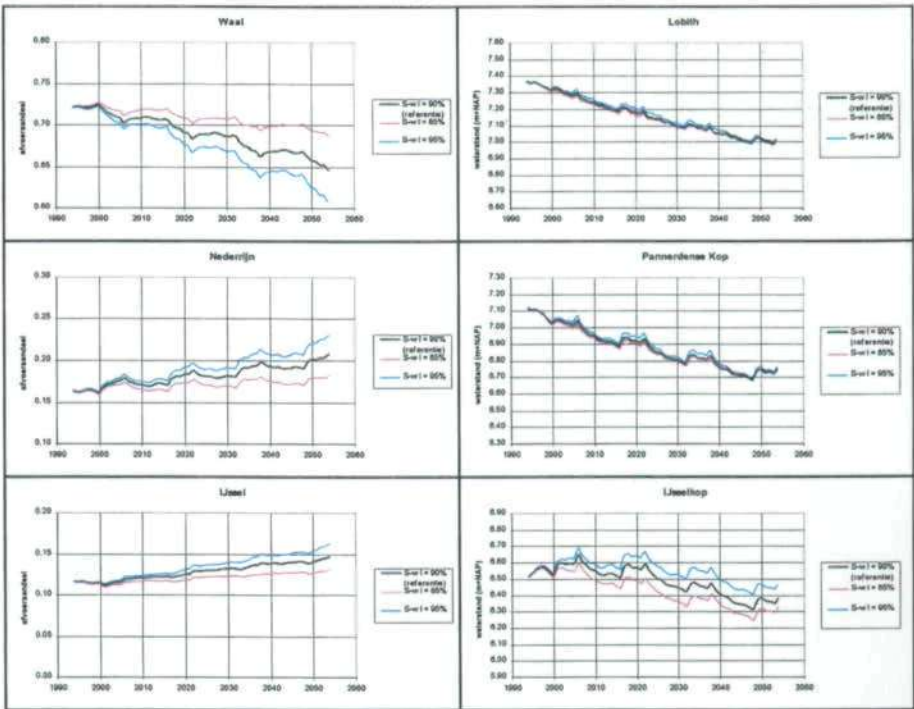
Figuur 31 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - IJssel.



Figuur 32 Gevoeligheid calibratiefactor transportformule - alle takken.



Figuur 33 Gevoeligheid verdeling sediment - Pannerdense Kop.



Figuur 34 Gevoeligheid verdeling sediment - IJsselkop.

