

Trekking WBC  
II-γ  
Q-γ

Opdrachtgever:

**RIZA**

Verbetering 1-D Rijntakkenmodel  
vanaf Andernach

Rapport

maart 2006

Opdrachtgever:

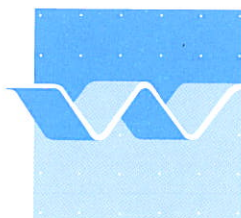
**RIZA**

## Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach

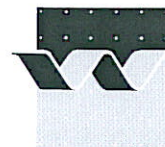
dr. ir. S. van Vuren en dr. ir. C. J. Sloff

Rapport

maart 2006



**wl | delft hydraulics**



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat, RIZA Gildemeestersplein 1 6826 LL Arnhem				
TITEL:	Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach				
SAMENVATTING:	<p>In het project 'Duurzame Vaardiepte Rijndelta' van Directie Oost-Nederland is behoefte aan een morfologisch voorspelinstrument om de ontwikkeling van de vaarwegdimensies in het Rijntakkenstelsel te analyseren. In 2001 heeft RIZA een 1-D morfologisch SOBEK model opgeleverd van de Nederlandse Rijntakken (Jesse &amp; Kroekenstoel, 2001). De kalibratie van dit model heeft zich beperkt tot een globale representatie van grootschalige morfologie en het sedimenttransport per riviertak. Er is niet gekeken naar de representatie van lokale bodemvariaties en de voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen.</p> <p>In opdracht van RIZA is in de huidige studie het 1-D Rijntakkenmodel verbeterd, door middel van een nieuwe modelkalibratie en verificatie. Tijdens de kalibratie zijn parameters van de sedimenttransportformule, de empirische splitsingspuntrelatie en het ruimtelijk verloop van de korreldiameter aangepast. De kalibratie en verificatie laten een duidelijke verbetering zien met betrekking tot zowel de grootschalige trends in de bodemligging als de trends in de lokale bodemvariaties die door Sieben (2005) middels een aantal karakteristieke parameters worden beschreven.</p> <p>Op de Nederrijn &amp; Bovenrijn en de riviertrajecten rond de Pannerdenschekop en de IJsselkop spelen in werkelijkheid gegradeerd-sedimentprocessen een rol in de morfologische ontwikkeling, die momenteel niet in het model worden beschouwd. Voor een goede representatie van het morfologische gedrag, de uitzeeving van sedimentfracties en de afpleisterlagen nabij splitsingspunten, wordt aanbevolen het Rijntakkenmodel uit te breiden naar een gegradeerd sedimentmodel.</p>				
REFERENTIES:	RIZA kenmerk RIA 2005-266				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	S. van Vuren			F.C.M. v.d. Knaap	C.A. Bons
PROJECTNUMMER:	Q4130				
TREFWOORDEN:	riviermorfologie, morfologisch model, Rijntakken, SOBEK				
AANTAL BLADZIJDEN:	66				
VERTROUWELIJK:	<input checked="" type="checkbox"/> JA, tot april 2009		<input type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1—1</b>
	1.1 Aanleiding tot het project .....	1—1
	1.2 Doel van de studie .....	1—1
	1.3 Afbakening .....	1—2
<b>2</b>	<b>Methode voor verbetering Rijntakkenmodel .....</b>	<b>2—1</b>
	2.1 Huidig morfologische Rijntakkenmodel.....	2—1
	2.2 Kalibratiegrootheden .....	2—1
	2.2.1 Karakteristieke morfologische parameters .....	2—1
	2.2.2 Stabiliteit van splitsingspunten .....	2—3
	2.2.3 Niet-lineariteitparameter in sedimenttransportformule.....	2—4
	2.3 Kalibratieparameters.....	2—6
	2.4 Gereedmaken model voor kalibratie en verificatie.....	2—7
<b>3</b>	<b>Kalibratie en verificatie Rijntakkenmodel .....</b>	<b>3—1</b>
	3.1 Kalibratieprocedure en modelaanpassingen .....	3—1
	3.2 Kalibratieperiode 1990-2000 .....	3—4
	3.3 Modelverificatie.....	3—8
	3.3.1 Verificatieperiode 1950-1970 .....	3—8
	3.3.2 Verificatieperiode 1970-1990 .....	3—9
<b>4</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>4—1</b>
<b>5</b>	<b>Literatuur .....</b>	<b>5—1</b>

# Bijlagen

<b>A</b>	<b>Morfologische parameters afgeleid uit JDP .....</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Ruimtelijk verloop korreldiameter <math>D_{50}</math> .....</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Resultaten modelkalibratie – morfologische parameters.....</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Resultaten modelkalibratie – Stabiliteit splitsingspunt .....</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Resultaten modelkalibratie – Niet-lineariteitparameter n .....</b>	<b>E-1</b>
<b>F</b>	<b>Resultaten modelverificatie – periode 1950-1970.....</b>	<b>F-1</b>
<b>G</b>	<b>Resultaten modelverificatie – periode 1970-1990.....</b>	<b>G-1</b>

# I Inleiding

## I.1 Aanleiding tot het project

In het project ‘Duurzame Vaardiepte Rijndelta’ van Directie Oost-Nederland is behoefte aan een morfologisch voorspelinstrument om de ontwikkeling van de vaarwegdimensies in het Rijntakkenstelsel te analyseren. Inzicht in de historische en toekomstige morfologische trends van de rivier is nodig om in te kunnen spelen op het effect van bodemveranderingen op de bevaarbaarheid van de rivier.

In 2001 heeft RIZA een 1-D morfologisch SOBEK model opgeleverd van de Nederlandse Rijntakken (Jesse & Kroekenstoel, 2001). Dit model is beperkt gekalibreerd. De modelkalibratie richtte zich op een globale representatie van grootschalige morfologie en het sedimenttransport per riviertak. Tijdens de kalibratie is niet gekeken naar de representatie van lokale bodemvariaties en de voortplantingssnelheid van lokale bodemveranderingen. Het 1-D Rijntakkenmodel is als zodanig dan ook beperkt toepasbaar om deze lokale bodemveranderingen betrouwbaar te voorspellen. Met betrekking tot scheepvaart en het voorspellen van de ontwikkeling van de vaarwegdimensies in het Rijntakkenstelsel is inzicht in het kleinschalige, lokale morfologische gedrag juist van belang. In opdracht van RIZA is in deze studie het 1-D Rijntakkenmodel verbeterd, door middel van een nieuwe modelkalibratie en verificatie.

## I.2 Doel van de studie

Het doel van deze studie is het 1-D Rijntakkenmodel af te regelen op zowel grootschalige, langzame morfologische veranderingen op rivierniveau en kleinschalige, relatief snelle morfologische veranderingen op uiterwaarniveau.

In Sieben (2005) is de historische ontwikkeling van de Rijntakken op beide schaalniveaus beschreven. Sieben heeft hierbij gebruik gemaakt van profielgemiddelde bodemliggingen die zijn afgeleid uit jaarlijkse dwarspeilingen (JDP) in de periode 1950-1990. De grootschalige trends in de bodemligging en trends in de lokale bodemvariaties van de Rijntakken in de periode 1950-1990 zijn beschreven met een aantal karakteristieke morfologische parameters, namelijk:

- Trajectgemiddelde van profielgemiddelde bodemveranderingen;
- Trajectgemiddelde bodemhellingen;
- Trajectgemiddelde van profielgemiddelde voortplantingssnelheid van lokale bodemveranderingen;
- Tijds gemiddelde van profielgemiddelde bodemgradiënten per km.

Deze uit bodempeilingen afgeleide karakteristieke morfologische parameters zijn gebruikt voor de herkalibratie van het bestaande 1-D Rijntakkenmodel. In Hoofdstuk 2 zal op de methode voor de herkalibratie verder worden ingegaan.

### I.3 Afbakening

De studie is uitgevoerd volgens de projectbeschrijving RIA 2005-266. De ijking van het bestaande morfologische SOBEK Rijntakkenmodel is gericht op de representatie van de door RIZA gespecificeerde morfologische parameters (Sieben, 2005). Naast deze parameters is ook gekeken naar de stabiliteit van de splitsingspunten en de niet-lineariteitparameter  $n$  in de sedimenttransportformule, indien deze wordt uitgedrukt als een functie van de stroomsnelheid tot de macht  $n$ .

Voor de kalibratie is de periode 1990-2000 aangehouden. De perioden 1950-1970 en 1970-1990 worden voor de verificatie gebruikt. Door RIZA (2005) is aangetoond dat het grootschalige morfologische gedrag in de betreffende periodes in belangrijke mate wordt bepaald door menselijk ingrijpen (waaronder de aanleg van de stuwen en het stuwbeheer in Nederrijn, bochtafsnijdingen, het baggeren en storten van sediment, en de aanleg van vaste lagen). Uitgangspunt van deze studie is dat deze menselijke ingrepen goed in het model zijn geschematiseerd.

De kalibratieparameters voor de modelkalibratie zijn beperkt tot volgende parameters:

1. parameters in de sedimenttransportformule;
2. de splitsingspuntrelaties, die de sedimentverdeling op de splitsingspunten beschrijven;
3. het ruimtelijk verloop van de korreldiameter  $D_{50}$ .

Voor de bovenstroomse trajecten in het model is bekend dat gegradeerd-sediment processen een belangrijke rol spelen bij het sedimenttransport, en de daaraan gerelateerde morfologische veranderingen. Hoewel het mogelijk is om met SOBEK deze processen te berekenen, is de benodigde uitbreiding van de schematisatie een dermate grote inspanning dat deze niet binnen het nieuwe project past.

## 2 Methode voor verbetering Rijntakkenmodel

### 2.1 Huidig morfologische Rijntakkenmodel

Het bestaande morfologische SOBEK Rijntakkenmodel dat is ontwikkeld door Jesse & Kroekenstoel (2001), vormt de basis voor de huidige studie. Dit model is gebaseerd op de hydraulische SOBEK schematisatie 2000.3 van Van der Veen (2003). De modelschematisatie is gebaseerd op bodempeilingen van 1997.

In de afgelopen jaren is een aantal veranderingen doorgevoerd in het model. Deze uitgangspunten en aanpassingen van het model zijn gespecificeerd in Kroekenstoel (2004). Aanpassingen in de ruimtelijke schematisatie van de korreldiameter en de ribbelfactor op het benedenstroomse traject van de Waal zijn gedaan om de voorspelde sedimentatie op de Beneden-Waal te reduceren. Daarnaast is de stuwaansturing van de stuwen in de Nederrijn en Lek (PID-controller) aangepast conform Van der Veen & Dirksen (2004).

### 2.2 Kalibratiegrootheden

Het doel van deze studie is het 1-D Rijntakkenmodel af te regelen op zowel grootschalige, langzame morfologische veranderingen op riviertakniveau en kleinschalige, relatief snelle morfologische veranderingen op uiterwaardniveau. De door Sieben (2005) uit bodempeilingen afgeleide karakteristieke morfologische parameters, die de historische ontwikkeling van de Rijntakken op beide schaalniveaus beschrijven, zijn gebruikt voor de kalibratie van het bestaande Rijntakkenmodel. In aanvulling op deze kalibratiegrootheden is de kalibratie ook gericht op de stabiliteit van de splitsingspunten en de niet-lineariteitparameter in de sedimenttransportformule. Een beschrijving van de kalibratiegrootheden volgt hieronder.

De modelkalibratie heeft betrekking op de periode 1990-2000. Vanaf 1990 is een nieuw baggerbeleid van kracht, waarin in principe geen netto sedimentonttrekkingen meer zijn toegestaan. Bovendien zijn de rivierkundig ingrepen die voor de morfologie van belang zijn in deze periode beperkt tot de aanleg van de vaste laag in de Waalbocht bij St. Andries en de bodemkribben bij Erlecom. Dit maakt de periode geschikt voor de modelkalibratie.

Voor de verificatie worden de perioden 1950-1970 en 1970-1990 aangehouden. De overgang tussen deze twee perioden wordt gekenmerkt door de sluiting van het Volkerak en het Haringvliet en de in gebruik name van de stuw Driel. In beide perioden zijn geen belangrijke tussentijdse rivierkundige ingrepen uitgevoerd.

#### 2.2.1 Karakteristieke morfologische parameters

Vanaf 1926 zijn jaarlijks dwarsdoorsnede gemiddelde bodemliggingen per rivierkilometer langs alle Rijntakken afgeleid uit bodempeilingen (Ten Brinke, 2000).



De peilingen zijn jaarlijks uitgevoerd in de periode april tot november. In de periode tot 1960 is handmatig gepeild met loodlijntjes. Vanaf 1960 zijn de metingen uitgevoerd met akoestische echo-lodingen.

Km-gemiddelde bodemliggingen zijn door Sieben (2005) gebruikt om de morfologische ontwikkeling van de Rijntakkenstelsel in de periode 1950-1990 met morfologische parameters te beschrijven. Om grootschalige trends in de bodemligging en trends in de lokale bodemvariaties te analyseren is onderscheid gemaakt tussen een ruimtelijk gemiddelde bodemligging en lokale bodemvariaties. De km-gemiddelde bodemligging op locatie  $x$  en tijdstip  $t$  is daarom door Sieben (2005) opgesplitst in twee componenten:

$$z_m(x, t) = Z(x, t) + z'(x, t) + \varepsilon(x, t) \quad (2-1)$$

met:  $z_m(x, t)$  de km-gemiddelde bodemligging volgend uit peilingen  
 $Z(x, t)$  de ruimtelijk gemiddelde bodemligging  
 $z'(x, t)$  de lokale bodemvariatie  
 $\varepsilon(x, t)$  de onnauwkeurigheid

Er is aangenomen dat de bijdrage van  $\varepsilon$  klein is ten opzichte van de lokale bodemvariatie.

De ruimtelijk gemiddelde bodemligging op locatie  $x$ , voor een traject met lengte  $L$ , is bepaald met:

$$Z(x, t) = i \left( \frac{L}{2} - x \right) + \overline{z(x, t)} \quad (2-2)$$

met:  $i$  de trajectgemiddelde bodemhelling  
 $\overline{z(x, t)}$  de trajectgemiddelde bodemligging

Op deze wijze kan uit de km-gemiddelde bodemligging van de bodempeilingen de lokale bodemvariatie  $z'(x, t)$  worden afgeleid.

Uit de lokale bodemvariaties kan de voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen worden afgeleid door de standaardafwijking van de jaarlijkse verandering van de lokale bodemvariatie te delen door de standaardafwijking van de bodemgradiënt van de lokale bodemvariatie, zie Sieben (2005). De snelheid waarmee lokale bodemveranderingen zich voortplanten in benedenstroomse richting is een indicator voor de morfologische tijdschaal van de rivier.

Grootschalige trends zijn door Sieben beschreven met:

- trajectgemiddelde profielgemiddelde jaarlijkse bodemveranderingen;
- trajectgemiddelde bodemhellingen.

Voor trends in lokale bodemveranderingen zijn de volgende morfologische parameters van belang:

- voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen;
- lokale afwijkingen in tijdsgemiddelde profielgemiddelde bodemgradiënten per km.

De trajectgemiddelde bodemhelling is een karakteristieke parameter voor grootschalige morfologische ontwikkeling door variaties in lange termijn afvoer en sedimenttransport. De afwijking tussen lokale bodemgradiënten en de trajectgemiddelde bodemhelling is een maat voor snel reagerende morfologische reacties veroorzaakt door lokale variaties in afvoerverdeling tussen zomerbed en winterbed tijdens hoogwatercondities.

Overeenkomstig Sieben (2005) zijn de morfologische parameters bepaald uit de resultaten van de SOBEK-berekeningen. Tijdens de kalibratie zijn trajectgemiddelde waarden en km-gemiddelde waarden van de morfologische parameters volgend uit bodempeilingen en de modelberekeningen met elkaar vergeleken. In Tabel 2-1 zijn de riviertrajecten gedefinieerd. De morfologische parameters die zijn afgeleid uit de jaarlijkse dwarspeilingen voor de betreffende kalibratie en verificatieperiode zijn per rivierlocatie en per riviertraject gegeven in Bijlage A.

Riviertraject	Naam riviertraject	km-raai
Waal 1	Bovenrijn	859-867
Waal 2	Boven-Waal	868-886
Waal 3	Midden-Waal	887-915
Waal 4	Beneden-Waal	916-951
PKNRL 1	Pannerdensch Kanaal	868-879
PKNRL 2	Nederrijn, 1ste stuwpand	880-891
PKNRL 3	Nederrijn, 2de stuwpand	892-922
PKNRL 4	Nederrijn, 3de stuwpand	923-947
PKNRL 5	Lek	948-989
IJssel 1	Boven-IJssel	880-930
IJssel 2	Midden-IJssel	931-970
IJssel 3	Beneden-IJssel	971-1000

Tabel 2-1: Riviertrajecten in het Rijntakkenstelsel.

## 2.2.2 Stabiliteit van splitsingspunten

In het Rijntakkenmodel zijn zes takken onderscheiden: de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de IJssel, de Nederrijn en de Lek. Twee splitsingspunten, de Pannerdensch Kop en de IJssel Kop, verbinden deze Rijntakken. Ter plaatse van de splitsingspunten bevinden zich bodemsprongen. In Sieben (2005) laat de tijdsafhankelijke ontwikkeling van 10-km gemiddelde bodemliggingen in de trajecten bij de splitsingspunten deze bodemsprongen goed zien.

De ontwikkeling van de lokale bodemsprong in de tijd geeft inzicht in de stabiliteit van de splitsingspunten. Het effect van de kalibratie op deze grootheden is geanalyseerd.

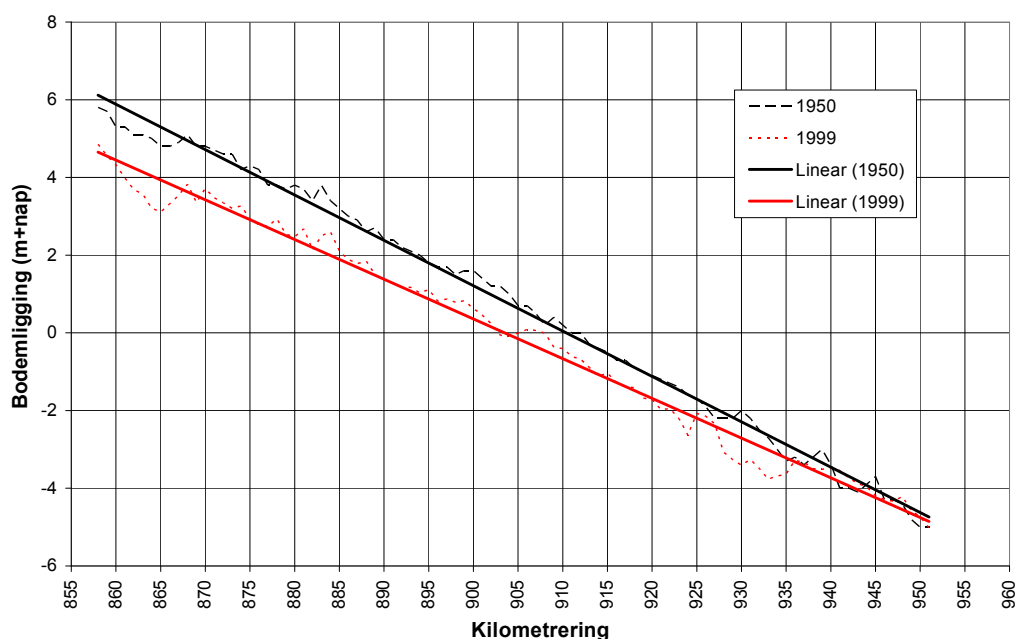
### 2.2.3 Niet-lineariteitparameter in sedimenttransportformule

De sedimenttransportcapaciteit  $s$  wordt vaak uitgedrukt als een algemene functie van de snelheid  $u$  tot de macht  $n$ :  $s = f(u) = m \cdot u^n$ . De niet-lineariteitparameter  $n$  in deze formule is bepalend voor de mate waarin de rivierbodem reageert op gradiënten in stroomsnelheden.

Het belang van de parameter  $n$  is eenvoudig te illustreren met een voorbeeld uit de evenwichtbenadering, waarin een eerste inschatting van het effect op de evenwichtswaterdiepte en het -verhang van een rivierkundige ingreep in een rechte rivier met een rechthoekige dwarsdoorsnede bij een constante afvoer kan worden gemaakt. In het geval van een rivierversmalling van breedte  $B_0$  naar  $B_1$  past het evenwichtsverhang zich als volgt aan:

$$\frac{i_1}{i_0} = \left( \frac{B_1}{B_0} \right)^{\frac{n-3}{n}} \quad (2-3)$$

Bij een niet-lineariteitparameter van  $n$  gelijk aan 3 heeft de rivierversmalling geen effect op het bodemverhang. De historische bodemontwikkeling van de Waal laat echter wel een verandering van het verhang zien na normalisatie, zie Figuur 2-1. De niet-lineariteitparameter  $n$  is dus belangrijk voor een goede effectbepaling van rivierkundige ingrepen.



Figuur 2-1. Verandering bodemverandering in de afgelopen 50 jaar als gevolg van de normalisatie.

In het huidige Rijntakkenmodel wordt het sedimenttransport beschreven met de Meyer-Peter-Müller sedimenttransportformule met een verlaagde kritische Shieldsparameter  $\theta_{kr}$  van 0,025. Voor deze transportformule is de parameter  $n$  een functie van de kritische Shieldsparameter, de Shieldsparameter en de ribbelfactor, namelijk:

$$n = \frac{3}{1 - \frac{\theta_{kr}}{\mu\theta}} \quad (2-4)$$

Met:

- $\mu$  de ribbelfactor
- $\theta$  de Shieldsparameter
- $\theta_{kr}$  de kritische Shieldsparameter

De Shieldsparameter is gelijk aan:

$$\theta = \frac{u^2}{C^2 \Delta D_{50}} \quad (2-5)$$

Met:

- $u$  de stroomsnelheid
- $C$  de Chézy coëfficiënt
- $D_{50}$  de korreldiameter die door 50% van het bodemmateriaal wordt onderschreden

De ribbelfactor is gelijk aan:

$$\mu = \left( \frac{C}{C_{90}} \right)^{3/2} = \left( \frac{C}{18 \log \frac{12h}{3D_{90}}} \right)^{3/2} \quad (2-6)$$

Met:

- $h$  de waterdiepte
- $D_{90}$  de korreldiameter die door 90% van het bodemmateriaal wordt onderschreden

Als de schuifspanning zeer groot is ten opzichte van de kritische Shieldsparameter nadert de parameter  $n$  naar de waarde 3. Het sedimenttransport is volgens de empirische voorspeller van Meyer-Peter-Müller dan onafhankelijk van de korreldiameter.

Omdat voor een goede beschrijving van morfologische veranderingen de gradiënten in het sedimenttransport cruciaal zijn, is tijdens de kalibratie naar een realistische waarde van  $n$  gestreefd. Voor morfologische verandering in de Rijntakken is de combinatie van bodem- en zwevend transport bepalend. Fysisch wordt het niet-lineaire gedrag van deze transporten op de Nederlandse Rijntakken correct beschreven met een parameter  $n$  tussen de 4 en 6.

## 2.3 Kalibratieparameters

Voor de modelkalibratie zijn volgende afregelparameters gebruikt:

1. parameters in de sedimenttransportformule;
2. de splitsingspuntrelaties, die de sedimentverdeling op de splitsingspunten beschrijven;
3. het ruimtelijk verloop van de korreldiameter  $D_{50}$ .

### Parameters sedimenttransportformule

In het huidige Rijntakkenmodel is het sedimenttransport beschreven met de Meyer-Peter en Müller transportformule met een verlaagde kritische Shieldsparameter  $\theta_{kr}$  van 0,025. De vermenigvuldigingsfactor van deze transportformule verschilt per tak.

Een bodemtransportformule is vanuit fysisch oogpunt met name geschikt voor de bovenstreams gelegen takken de Bovenrijn en het Pannerdensch Kanaal. Op deze takken is bodemtransport dominant. In benedenstroomse richting neemt de bijdrage van suspensietransport aan het totaal transport toe en zou een transportformule die zowel bodem- als suspensietransport beschrijft beter voldoen.

Toepassing van alternatieve transportformules dan de formules die in de SOBEK software zijn opgenomen, vraagt een dermate grote inspanning dat deze niet past binnen het beoogde project. Voorkeur wordt gegeven aan het gebruik van de aangepaste Meyer-Peter en Müller transportformule die is toegepast in het huidige Rijntakkenmodel. Tijdens de kalibratie is de keuze voor een verlaagde kritische Shieldsparameter  $\theta_{kr}$  wel opnieuw beschouwd. Onder andere, omdat de kritische Shieldsparameter de waarde van de niet-lineariteitparameter  $n$  beïnvloedt, zie Paragraaf 2.2.3. De afregelparameters in de sedimenttransportformule zijn beperkt tot de kritische Shieldsparameter  $\theta_{kr}$  en de vermenigvuldigingsfactor in de reeds beschikbare aangepaste Meyer-Peter en Müller transportformule.

### Splitsingspuntrelatie

In het Rijntakkenmodel zijn zes takken onderscheiden: de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de IJssel, de Nederrijn en de Lek. Twee splitsingspunten, de Pannerdensch Kop en de IJsselkop, verbinden deze Rijntakken.

Op de Pannerdensch Kop wordt de afvoerverdeling geheel gestuurd door het doorstroomvermogen en weerstand van de uitstromende takken en het verschil in waterstandsverhang tussen de uitstromende takken. Op de IJsselkop wordt de waterverdeling voor afvoeren tot een niveau van 2400 m<sup>3</sup>/s bij Lobith gecontroleerd door de stuw bij Driel in de Nederrijn.

De sedimentverdeling op beide splitsingspunten moet expliciet worden opgegeven door middel van een empirische knooppuntrelatie:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^k \cdot \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^m \quad (2-7)$$

In het huidige Rijntakkenmodel is de sedimentverdeling over de uitstromende takken beschreven met een lineaire relatie van de waterverdeling over deze takken:

$$\frac{S_1}{S_2} = \alpha \cdot \frac{Q_1}{Q_2} + \beta \quad (2-8)$$

De coëfficiënt  $m$  in Vgl. 2-1 is dus gelijk gesteld aan nul. De coëfficiënt  $\beta$  is voor beide splitsingspunten gelijk gesteld aan nul. De coëfficiënt  $\alpha$  is voor de Pannerdensche Kop en IJsselkop respectievelijk 3 en 1,5.

Volgens Wang & Van der Kaaij (1994) moet voor een stabiel splitsingspunt de coëfficiënt  $m$  in de knooppuntrelatie groter zijn dan  $n/3$ , waarin  $n$  de niet-lineariteitparameter van de sedimenttransportformule is. Met een coëfficiënt  $m$  gelijk aan 1 wordt niet aan deze voorwaarde voldaan. In RIZA (2006) wordt voor de coëfficiënt  $m$  een waarde 2 à 3 voorgesteld.

### Ruimtelijk verloop korreldiameter $D_{50}$

Afhankelijk van de transportformule, speelt ook de ruimtelijke gradiënt in bodemsamenstelling een rol bij het grootschalige gedrag. In eerste instantie wordt gebruik gemaakt van de reeds in het huidige model beschikbare bodemsamenstelling. Echter de gradiënt in langsrichting kan tijdens de kalibratie eventueel in geringe mate worden gevarieerd om het resultaat te verbeteren.

## 2.4 Gereedmaken model voor kalibratie en verificatie

Met behulp van bodemmetingen, historische afvoertijdreeksen, bagger- en stortgegevens en een overzicht van rivierkundige ingrepen in het Rijntakkenstelsel, is voor de kalibratie- en verificatieperioden is het volgende in het model aangepast:

1. de schematisatie van dwarsdoorsneden;
2. de afvoertijdreeksen op de bovenrand en de laterale afvoertijdreeksen;
3. de afvoerhydrograaf op benedenranden;
4. de netto sedimentonttrekkingen;
5. de vaste lagen;
6. de stuwen en het stuwprogramma.

### Schematisatie van dwarsdoorsneden

Een nieuwe schematisatie van dwarsdoorsneden is vereist voor het begin van de kalibratie en de verificatieperiode. Initiële SOBEK profielen zijn niet direct beschikbaar voor het jaar 1950, 1970 en 1990. De originele SOBEK profielen zijn daarom aangepast met behulp van jaarlijkse dwarspeilingen. Het verschil in de gepeilde bodemliggingen tussen 1997 (het jaar waarop de originele SOBEK profielen zijn gebaseerd) en het beginjaar van de kalibratieperiode,  $\Delta z$ , zijn gebruikt om voor elk gridpunt het SOBEK profiel aan te passen.

Voor elke dwarsdoorsnede is onderscheid gemaakt tussen de hoofdgeul, het kribvak en de uiterwaard. Dwarsdoorsneden zijn beschreven met 15 punten: 5 voor de hoofdgeul, 3 voor het kribvak en 7 voor de uiterwaard.

Voor elk punt is de bodemligging, de totaal-breedte en de stroomvoerende breedte gespecificeerd. Het sedimenttransport vindt uitsluitend plaats in de hoofdgeul over de gespecificeerde sedimenttransporterende breedte. De correctie van dwarsdoorsneden heeft alleen betrekking op de hoofdgeul. Morfologische veranderingen worden proportioneel verdeeld over de lokale diepten in de 5 punten van de hoofdgeul. Bij de aanpassing van het profiel is rekening gehouden met deze diepte-afhankelijkheid. De grootste aanpassing in het profiel vindt dus plaats op het diepste punt, zie Figuur 2-2.

De procedure is als volgt:

1. De totale verandering in de doorsnede van de hoofdgeul is  $B_s \cdot \Delta z$

Met:

$\Delta z$       verschil in de gepeilde bodemliggingen tussen 1997 en jaar  $i$

$B_s$       de stroomvoerende breedte van het hoogste punt van de hoofdgeul

2. De bodemligging in de dieptepunten van de hoofdgeul zijn aangepast met  $\alpha_i \cdot \Delta z_p$ . De waarde  $\alpha_i$  varieert voor de 5 punten in de hoofdgeul:

$\alpha_1 = 1$                       voor het diepste punt in de hoofdgeul

$\alpha_i = \frac{(z_s - z_i)}{(z_s - z_b)}$       voor de overige punten in de hoofdgeul,  $i=2, 3, \dots, 5$

Met:

$z_s$       de bodemligging van het hoogste punt van de hoofdgeul

$z_i$       de bodemligging op punt  $i$

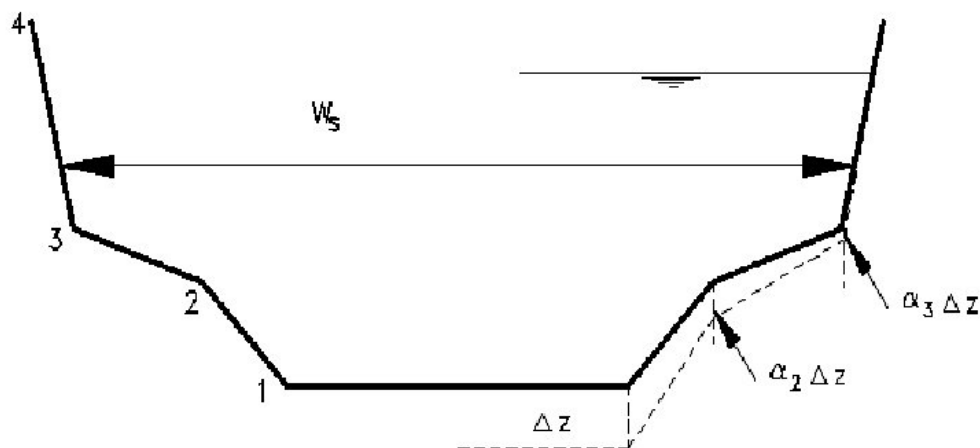
$z_b$       de bodemligging op het diepte punt

3. De waarde voor  $\Delta z_p$  is als volgt bepaald:

$$\Delta z_p = \frac{2 \cdot B_s \cdot \Delta z}{\left( B_1 + \sum_{i=1}^5 \alpha_i B_{i+1} - \sum_{i=1}^4 \alpha_{i+1} B_i \right)} \quad (2-9)$$

Met  $B_i$  de stroomvoerende breedte op punt  $i$ .

De procedure is herhaald voor de verificatieperioden.



Figuur 2-2: Aanpassing Sobekprofiel.

## Afvoertijdreeks op de bovenrand en laterale afvoertijdreeksen

Dagelijkse rivierafvoeren ter plaatse van Lobith zijn beschikbaar vanaf 1900. Deze afvoermetingen zijn gebruikt om de afvoertijdreeks op de bovenrand aan te passen voor de kalibratie en verificatieperioden. De afvoermetingen bij Lobith zijn geprojecteerd op de bovenrand bij Andernach. Laterale instromingen op de Niederrhein zijn niet meegenomen. Met het aanpassen van de afvoertijdreeks op de instroomrand van het model moeten ook de laterale instromingen in het model worden aangepast. De laterale instromingen zijn gerelateerd aan de afvoer bij Lobith. Voor het genereren van tijdreeksen voor de laterale instroming is gebruik gemaakt van de relaties in Van der Veen (2003).

## Afvoerhydrograaf op benedenranden

Er is gekozen om de waterstand-afvoerrelaties op de benedenranden voor de kalibratie en verificatieperioden niet te veranderen.

## Netto sedimentonttrekkingen

De database met onderhoudsbagger- en stortgegevens van RIZA is gebruikt om per riviertraject voor de kalibratie- en verificatieperioden de netto sedimentonttrekkingen te bepalen. De database bevat gegevens over de periode 1900-2000. Een onvolledige en onnauwkeurige registratie beperkt een goede analyse van het bagger- en stortwerk (Van Vuren & Barneveld, 2004). Tot midden jaren '70 vond baggerwerk ongecontroleerd en ongelimiteerd plaats. Daarnaast zijn vaak wel totale baggervolumes geregistreerd per riviertak, maar niet de precieze baggerlocatie.

Voor elk riviertraject is een netto sedimentonttrekking [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] over de lengte van het traject in het Rijntakkenmodel verwerkt, zie Tabel 2-2. Het netto baggervolume is berekend uit de geregistreerde bagger- en stortvolumes binnen en buiten de normaallijnen als functie van ruimte en tijd. De volumes die niet gelokaliseerd zijn, maar wel per riviertak geregistreerd zijn, zijn naar ratio tot wel geregistreerde volumes verdeeld over de riviertrajecten.

De trajectlengten wijken voor de Boven-Waal en Midden-Waal iets af van de lengten die uit de kilometerraaien uit Tabel 2-1 kunnen worden afgeleid. Er is aangenomen dat er ter plaatse van de vaste lagen tussen km 878 en km 895 niet gebaggerd wordt. Voor Boven-Waal is het baggerwerk verdeeld over km 868-878 en voor Midden-Waal over km 895-915. Op de Boven-IJssel is rekening gehouden met de lengtereductie van de rivier door de bochtafsnijdingen bij Doesburg en Rheden/De Steeg.

Ten aanzien van het baggerwerk in de Beneden-Waal lijken er een aantal fouten te staan in in de database opgenomen baggervolumes in de sectie buiten de normaallijnen. Zo is buiten de normaallijnen op km 930 in 1972 een baggervolume van 52 miljoen  $\text{m}^3$ , op km 937 in 1977 een volume van 110 miljoen  $\text{m}^3$  en op km 929 in 1979 een volume 19 miljoen  $\text{m}^3$  geregistreerd. Vermoedelijk zijn er komma's verkeerd geplaatst. De volumes zijn daarom met een factor 100 verlaagd. Dit resulteerde in een netto sedimentonttrekking van  $6.27 \cdot 10^{-5}$  in plaats van  $1.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  voor de verificatieperiode 1970-1990.



Naam riviertraject	Netto baggervolume [m <sup>3</sup> ]			Netto sedimentonttrekking [m <sup>2</sup> /s]		
	1950-1970 <sup>1</sup>	1970-1990 <sup>2</sup>	1990-2000	1950-1970 <sup>1</sup>	1970-1990 <sup>2</sup>	1990-2000
Bovenrijn	565000	152300	267400	9.945E-08	2.682E-08	1.570E-07
Boven-Waal	565000	275700	370400	8.525E-08	4.163E-08	1.864E-07
Midden-Waal	565000	4028200	437900	4.476E-08	3.193E-07	1.157E-07
Beneden-Waal	565000	14243800	2606000	2.487E-08	6.273E-07	3.826E-07
Pannerdensch Kanaal	217300	289100	0	3.132E-08	5.209E-08	0
Nederrijn, 1ste stuwpand	0	102800	0	0	1.826E-08	0
Nederrijn, 2de stuwpand	4090500	506700	0	2.191E-07	3.193E-08	0
Nederrijn, 3de stuwpand	2546000	59000	0	1.869E-07	5.099E-09	0
Lek	4212000	2124600	0	1.645E-08	9.761E-08	0
Boven-IJssel	2075300	933700	0	7.910E-08	4.448E-08	0
Midden-IJssel	0	1429700	0	0	7.359E-08	0
Beneden-IJssel	350000	692300	0	1.850E-08	4.573E-08	0
Keteldiep	0	1481800	0	0	5.221E-07	0
Kattendiep	3354300	4426300	636300	1.662E-05	8.772E-06	4.2E-06

<sup>1</sup> In het Kattendiep en Keteldiep is baggerwerk pas vanaf 1962 geregistreerd. Het baggerwerk in de periode 1962-1970 wordt representatief geschat voor het baggerwerk in de periode 1950-1962.

<sup>2</sup> In de IJssel en in het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Lek, is vanaf 1985 en 1986 geen baggerwerk meer geregistreerd. Aangenomen is dat er vanaf deze jaren geen baggerwerk heeft plaatsgevonden.

Tabel 2-2. Netto sedimentonttrekking per riviertraject en per periode.

## Vaste lagen in de Waalbochten

In een aantal rivierbochten in de Waal zijn midden jaren '80 en '90 ten behoeve van de scheepvaart bodemconstructies aangebracht. In de buitenbocht bij Erlecom (km 873-876) zijn bodemkribben en in de buitenbochten bij Nijmegen (km 882-885) en St. Andries (km 925-928) zijn vaste lagen aangelegd. Deze vaste lagen zijn ook in de modelschematisatie geïmplementeerd. Voor de verificatieperioden zijn deze vaste lagen uit het model verwijderd.

## Stuwen en het stuwprogramma

De stuwen in de Nederrijn en Lek bij Driel, Hagestein en Amerongen zijn respectievelijk in 1970, 1958 en 1966 in gebruik genomen. Voordat het huidige stuwprogramma operationeel werd, is in een korte periode na aanleg van de stuwen geëxperimenteerd met de afvoeren. De opdrachtgever heeft aangegeven dat de invloed hiervan op grootschalige morfologische trends buiten beschouwing mag worden gelaten. Voor het morfologische I-D Rijntakkenmodel mag een constant stuwprogramma worden verondersteld.

Voor de verificatieperiode 1950-1970 zijn de stuwen uit het model verwijderd.

## 3 Kalibratie en verificatie Rijntakkenmodel

### 3.1 Kalibratieprocedure en modelaanpassingen

Uit een simulatie met het originele Rijntakkenmodel volgt in welke mate de uit het model berekende morfologische grootheden afwijken ten opzichte van de waarden die uit de jaarlijkse dwarspeilingen zijn afgeleid. In Bijlage B-E zijn de traject- en km-gemiddelde waarden voor de morfologische grootheden voor zowel de berekeningen als de metingen gegeven.

De kalibratie is uitgevoerd in een aantal fasen, waarbij het effect van modelaanpassingen op de verschillende kalibratiegrootheden uit Paragraaf 2.2 stapsgewijs is onderzocht. Elk van de kalibratiefase is gericht op het verbeteren van één of meerdere kalibratiegrootheden. De fasen zijn hieronder gegeven:

1. *Correctie  $\theta_{kr}$  gericht op de niet-lineariteitparameter  $n$ .* Uit de simulatie met het originele Rijntakkenmodel blijkt dat de niet-lineariteitparameter  $n$  regelmatig kleiner is dan 4, zie Bijlage E. Door de kritische Shieldsparameter te verhogen neemt de waarde van de niet-lineariteitparameter toe, zie Paragraaf 2.2.3. Een verhoging van de kritische Shieldsparameter beïnvloedt echter het moment waarop sediment in beweging wordt gebracht. Op basis van het percentage van de tijd dat sedimenttransport optreedt ( $\mu \cdot \theta > \theta_{kr}$ ) en de hoogte van  $\mu \cdot \theta$  is per riviertak een keuze gemaakt voor de kritische Shieldsparameter, zie Tabel 3-1.  $\theta_{kr}$  is zo gekozen dat er tenminste 90% van de tijd transport optreedt. Het percentage van de tijd dat er sedimenttransport optreedt in de Nederrijn & Lek is erg laag, namelijk rond de 35-60 %. Op deze riviertakken is de bijdrage van suspensietransport aan het totaal transport groot en zou een transportformule die zowel bodem- als suspensietransport beschrijft beter voldoen (ook bij lage afvoeren). Om deze reden is gekozen op de Nederrijn & Lek de Engelund & Hansen transportformule toe te passen.

Riviertak	Oude kritische Shieldsparameter	Nieuwe kritische Shieldsparameter
Niederrhein & Bovenrijn	0.025	0.035
Waal	0.025	0.047
Pannerdensche Kanaal	0.025	0.035
Nederrijn & Lek	0.025	Engelund & Hansen
IJssel	0.025	0.047

Tabel 3-1. Keuzen voor kritische Shieldsparameter per riviertak.

2. *Correctie vermenigvuldigingsfactor transportformule gericht op voortplantingssnelheid.* De toepassing van de methode van Sieben (2005) op de modelresultaten leidt tot voortplantingssnelheden die niet overeenkomen met de voortplantingssnelheden van een gebaggerde geul in het model. Het doel is het simuleren van de lokale morfodynamica

die wordt weergegeven met deze voortplantingssnelheden. Daarom is gekozen voor de toepassing van een analytische afleiding van de voortplantingssnelheid op basis van de simple-wave benadering van Vreugdenhil & de Vries (1973). Deze analytische toepassing geeft wel een goed beeld van de voortplanting van lokale bodemverstoringen. De voortplantingssnelheid  $c$  tijdens de kalibratie is als volgt bepaald voor de trajecten waarop de Meyer-Peter en Müller transportformule is gebruikt:

$$c = u \frac{ds(u)}{du} \frac{1}{h} = 3 \frac{\sqrt{g\Delta D_{50}}}{(1-\varepsilon)(1-Fr^2)} \beta_u \mu \frac{\theta}{h} (\mu\theta - \theta_{cr})^{1/2}$$

Met:

- $u$  de stroomsnelheid
- $\psi$  de dimensieloze transportparameter
- $Fr$  het Froudegetal
- $D_{50}$  de korrel diameter die door 50% van het bodemmateriaal wordt onderschreden
- $g$  de zwaartekrachtconstante
- $\Delta$  relatieve dichtheid
- $\varepsilon$  de porositeit
- $\beta_u$  constante gelijk aan 8
- $\mu$  de ribbelfactor
- $\theta$  de Shieldsparameter
- $h$  de waterdiepte
- $\theta_{cr}$  de kritische Shieldsparameter

Voor de trajecten met de Engelund & Hansen formule geldt:

$$c = u \frac{ds(u)}{du} \frac{1}{h} = 5 \frac{0.05}{(1-\varepsilon)\sqrt{gC^3\Delta^2 D_{50}}(1-Fr^2)} \frac{u^5}{h}$$

Met  $C$  de Chézy coëfficiënt.

De voortplantingssnelheden van lokale bodemverstoringen die volgen uit de originele modelsimulatie zijn op de Bovenrijn & Waal-trajecten meer dan een factor 2 te groot. Uitgaande van de nieuwe kritische Shieldsparameters zijn de vermenigvuldigingsfactoren in de transportformule aangepast, zie Tabel 3-2.

Riviertak	Oude vermenigvuldigingsfactor	Nieuwe vermenigvuldigingsfactor
Niederrhein & Bovenrijn	1	0.83
Waal	0.8	0.47
Pannerdensch Kanaal	0.8	1.25
Nederrijn & Lek	0.8	0.93
IJssel	0.6 – 0.8	1.85

Tabel 3-2. Keuzen voor vermenigvuldigingsfactoren in de sedimenttransportformule per riviertak.

3. *Correctie splitsingspuntrelatie gericht op stabiliteit en sedimentverdeling.* Voor een stabiel splitsingspunt moet de coëfficiënt  $m$  in de knooppuntrelatie groter zijn dan de niet-lineariteitparameter gedeeld door 3. In RIZA (2006) wordt voor de coëfficiënt  $m$  een waarde 3 voorgesteld. Tijdens de kalibratie wordt dit als uitgangspunt genomen. De waarde van coëfficiënt  $k$  is tijdens de kalibratie gevarieerd. De variatie van coëfficiënt  $k$  is gericht op de stabiliteit van het splitsingspunt en de sedimentverdeling. Theoretisch moet coëfficiënt  $k$  gelijk zijn aan  $1-m$  (Wang & Van der Kraaij, 1994), maar na kalibratie is voor de Pannerdensch Kop en de IJsselkop de coëfficiënt  $k$  vastgesteld op respectievelijk -1.1 en -1.2.
4. *Correctie ruimtelijk verloop korreldiameter.* De laatste fase van de modelkalibratie is gericht op een goede representatie van de waargenomen jaarlijkse bodemveranderingen. Uitgangspunt in deze kalibratiefase is dat morfologische veranderingen in de tijd worden veroorzaakt door ruimtelijke gradiënten in het sedimenttransport. Gegeven de jaarlijkse bodemveranderingen kan uitgaande van de sedimentbalans

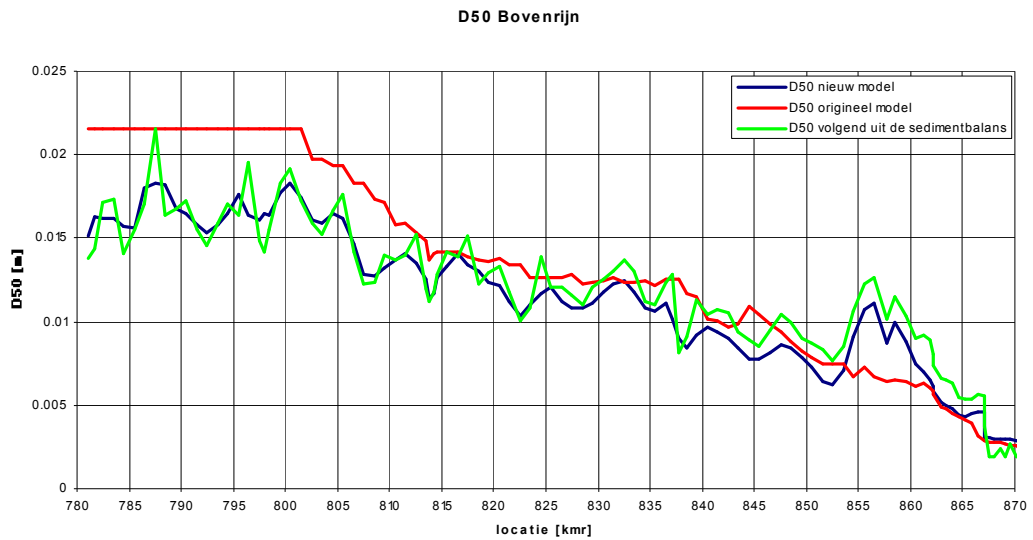
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0$$

door middel van lokale variatie in de korreldiameter  $D_{50}$  de ruimtelijke gradiënten in het sedimenttransport op de jaarlijkse bodemveranderingen worden afgeregeld. De volgende procedure is gevolgd voor elke riviertak (Baur & Sloff, 2003):

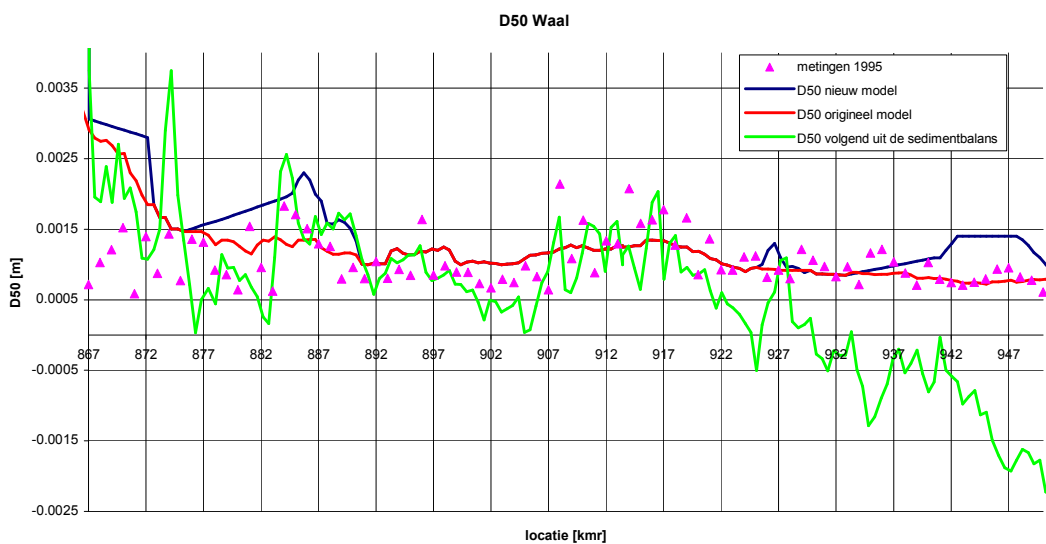
- a) *Vertalen van waargenomen bodemveranderingen ( $\partial z/\partial t$ ) in de kalibratieperiode naar lokale gradiënten in het sedimenttransport ( $\partial S/\partial x$ ).*
- b) *Kies een geschikte waarde voor het sedimenttransport op de bovenrand en gebruik de gradiënten in sedimenttransport om het ruimtelijk verloop van het transport te bepalen.*
- c) *Gebruik de transportformule om het ruimtelijk verloop van de korreldiameter te bepalen die past bij het ruimtelijk verloop van het sedimenttransport.*
- d) *Pas het nieuwe ruimtelijk verloop van de korreldiameter toe en analyseer de resultaten. De gradiënten in het verloop van de korreldiameter kunnen vervolgens handmatig worden aangepast.*

Het betreft dus een fijne afregeling die is bedoeld om de lokale variaties in morfologie beter in overeenstemming te brengen met waarnemingen. Deels wordt met deze afregeling het effect van sprongen en kalibratieeffecten in de hydraulische ruwheden gecompenseerd. Voor de fysica is het wel van belang te zorgen dat de diameters variëren binnen de bandbreedte van de waargenomen diameters. Opgemerkt moet worden dat er niet is gekozen ook de  $D_{90}$  te variëren, omdat het effect via de ribbelfactor relatief klein is.

Voor de Niederrhein, de Bovenrijn en de Waal is het ruimtelijk verloop van de korreldiameter volgend uit de sedimentbalans met de uiteindelijk toegepaste korreldiameters in weergegeven Figuur 3-1 en Figuur 3-2. Op de Waal is duidelijk van het uit de sedimentbalans bepaalde korrelverloop afgeweken. Dit komt door de grote fluctuatie in het ruimtelijk verloop. Bovendien moet bij een sedimenttransport van 300,000 m<sup>3</sup>/jaar op de bovenrand, de korreldiameter op de benedenstroomse delen negatief worden om de sedimentbalans kloppend te houden. In Bijlage B is voor elke riviertak het ruimtelijke korrelverloop gegeven.



Figuur 3-1. Ruimtelijk verloop korreldiameter in de Niederrhein en Bovenrijn.



Figuur 3-2. Ruimtelijk verloop korreldiameter in de Waal.

## 3.2 Kalibratieperiode 1990-2000

De simulatie met het originele Rijntakkenmodel laat zien dat een aantal uit het model berekende morfologische grootheden sterk afwijkt van de waarden die uit de jaarlijkse dwarspeilingen zijn afgeleid. De modelaanpassingen in de kalibratiefase uit Paragraaf 3.1 hebben de representatie van deze grootheden verbeterd, zie Bijlage B-E. Tijdens de kalibratie is de grootste prioriteit gegeven aan de representatie van jaarlijkse bodemveranderingen, voortplantingssnelheden en de niet-lineariteitparameter in de sedimenttransportformule.

De belangrijkste resultaten zijn per kalibratiegrootte hieronder samengevat:

- Karakteristieke morfologische parameters:
  - *Jaarlijkse bodemveranderingen:*
    - Niederrhein & Bovenrijn - een grote erosie golf benedenstrooms van de vaste laag bij Emmerich (km 840) tot aan de Pannerdenschekop, ongeveer 10-12 cm per jaar, is het meest opvallend in de simulatie met het originele model. Uit de metingen blijkt dat er wel erosie optreedt, maar dat dit tot een maximum van 3-4 cm per jaar beperkt blijft. In het nieuwe model is de erosie beperkt tot maximaal 5 cm per jaar door de korreldiameter lokaal te vergroven. Op deze riviertak zijn gegradeerd-sedimentprocessen bepalend voor het morfologische gedrag. Voor een goede representatie van het morfologische gedrag zouden deze processen in het model moeten worden opgenomen.
    - Waal - Direct benedenstrooms van de Pannerdenschekop tot aan de vaste lagen wordt met het originele model te weinig erosie voorspeld (op sommige locaties zelfs aanzanding). Op het traject 905-930 wordt flinke erosie voorspeld terwijl de bodem daar min of meer stabiel blijft. Vanaf km 940 voorspelt het model te veel aanzanding in vergelijking tot de metingen. Tijdens de kalibratie zijn niet alleen de trajectgemiddelde jaarlijkse bodemveranderingen flink verbeterd, maar is ook expliciet gekeken naar het bodemverloop langs de gehele Waal. In het nieuwe model wordt direct benedenstrooms van de vaste lagen nog iets te veel erosie voorspeld.
    - Pannerdenschekanaal - de trajectgemiddelde jaarlijkse bodemveranderingen komen goed overeen. Echter langs het Pannerdenschekanaal zien we in zowel het originele als het nieuwe model, een versteiling van de bodem die niet in de metingen is waargenomen. De toename in de sedimenttransporterende breedte van 126 aan het begin naar 152 m aan het einde van het kanaal kan tot deze versteiling hebben geleid. Bovendien spelen op het Pannerdenschekanaal gegradeerd-sedimentprocessen een grote rol, terwijl in het model een ruimtelijk variërende uniforme korrelverdeling is opgenomen.
    - Nederrijn & Lek - Voor de simulatie met het originele model liggen de trajectgemiddelde bodemveranderingen en de bodemverandering langs de rivier structureel boven de waargenomen bodemveranderingen. Door de toepassing van de bodemtransportformule van Meyer-Peter en Müller wordt het sedimenttransport op deze takken onderschat. Met het gebruik van de transportformule van Engelund & Hansen en aanpassingen in het ruimtelijk korreldiameterverloop, komen de nieuwe berekeningen redelijk goed met de metingen overeen.
    - IJssel - Een grote erosiekuil in het originele model juist benedenstrooms van de IJsselkop tot aan km 900 is veroorzaakt door een steile afname van de korreldiameter op dat traject. Een fijnere korrel met een minder steil verloop voorkomt de erosie in het nieuwe model. De nieuwe ruimtelijke korrelverdeling past nog steeds goed bij de korrelmetingen van de meetcampagne van 1995. Op de Boven-IJssel is in werkelijkheid sprake van een zeer gevarieerde bodemsamenstelling. Het grof materiaal vormt een afpleisterlaag op het fijner materiaal. Ook op dit traject zou het morfologische bedrag beter beschreven kunnen worden met een gegradeerd-sedimentmodel.
  - *Bodemhellingen:* de traject- en km-gemiddelde bodemhellingen komen voor het originele en nieuwe model redelijk goed overeen met de bodemhellingen die op basis van de jaarlijkse dwarspeilingen zijn bepaald.

- *Voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen*: De voortplantingssnelheden op de Niederrhein, Bovenrijn en Waal zijn in het oorspronkelijke model meer dan een factor 2 groter dan de voortplantingssnelheden die op basis van de bodempeilingen zijn bepaald. Op de overige riviertakken worden de voortplantingssnelheden juist, in toenemende mate in benedenstroomse richting, onderschat (max. een factor 6 te klein). De voortplantingssnelheden in het nieuwe model komen na de aanpassingen van de vermenigvuldigingsfactoren goed overeen met de metingen. Op de benedenstroomse trajecten van de Waal, de Lek en de IJssel worden de voortplantingssnelheden nog iets onderschat. Dit komt onder andere doordat de instellingen van de transportformules over de gehele takken constant zijn genomen en gekalibreerd is op een goede representatie van de voortplantingssnelheden op de bovenstroomse trajecten.
- *Lokale afwijkingen in tijdsgemiddelde bodemgradiënten per km*: de traject- en km-gemiddelde lokale afwijkingen in de tijdsgemiddelde bodemgradiënten per km komen voor het originele al redelijk goed overeen met de bodemhellingen die op basis van de jaarlijkse dwarspeilingen zijn bepaald. In het nieuwe model is een kleine verbetering gerealiseerd.
- **Stabiliteit rond splitsingspunten**: De tijdsafhankelijke ontwikkeling van de bodemsprong en de 10-km gemiddelde bodemligging rond splitsingspunten geeft inzicht in de stabiliteit. In Bijlage D is het tijdsafhankelijke verloop volgend uit de metingen en de modelberekeningen voor de kalibratie en de verificatie weergegeven. In de periode voor de inwerkingtreding van de stuwen komt het waargenomen gedrag voor het originele en het nieuwe model niet overeen met de metingen. Hier wordt in Paragraaf 3.3.1 verder op ingegaan. Na de aanleg van de stuwen wordt de bodemsprong rond de Pannerdensche Kop redelijk goed voorspeld. Het nieuwe model komt beter overeen met het waargenomen gedrag dan het originele model. De bodemsprong op het Pannerdensche Kanaal neemt af in de tijd, terwijl een langzame toename is te zien van de bodemsprong op de Waal. Dit is in overeenstemming met de metingen. De modelaanpassingen in het nieuwe model laten een duidelijke verbetering zien van de voorspelling van het verloop van de 10-km gemiddelde bodemligging op de Bovenrijn & Waal in de tijd ten opzichte van het originele model.

De bodemontwikkeling in het Pannerdensche Kanaal komt voor zowel het originele als het nieuwe model niet overeen met de metingen. Op de IJsselkop zien we ook grote verschillen tussen de modelberekeningen en het waargenomen morfologische gedrag. Op deze trajecten spelen gegradeerd-sediment processen een grote rol die in het model niet zijn beschouwd.

Naast een analyse naar het tijdsafhankelijke gedrag van bodemsprongen en de 10-km trajectgemiddelde bodemliggingen is ook de afvoer- en sedimentverdeling op splitsingspunten geanalyseerd. In het originele model gaat als functie van de tijd het Pannerdensche Kanaal steeds meer water trekken ten koste van de Waal-afvoer. Dit is in overeenstemming met de analyse van Schropp (2000), die een afname van de Waalafvoer van 5-10% ten gunste van het Pannerdensche Kanaal voorspelt. In het nieuwe model neemt de Waalafvoer in de tijd juist toe. Dit lijkt een verslechtering van het model. Echter als we kijken naar de morfologische ontwikkeling dan lijkt de afname van de Waalafvoer in het originele model het gevolg van het feit dat direct benedenstrooms van het splitsingspunt te weinig erosie en op sommige locaties zelfs

aanzanding wordt voorspeld, terwijl deze morfologische reactie niet in de jaarlijkse dwarspeilingen is waargenomen. De waargenomen erosie tussen het splitsingspunt en de vaste lagen wordt wel voorspeld in het nieuwe model. Als gevolg hiervan gaat de Waal juist meer water trekken. In werkelijkheid wordt het morfologische gedrag rond de splitsingspunten beïnvloed door gegradeerd-sediment processen die niet in het model zijn beschouwd. Het verdient aanbeveling de verandering in afvoerverdeling opnieuw te analyseren indien deze processen wel zijn meegenomen.

De sedimentverdeling op de splitsingspunten in het originele en het nieuwe model staan in Tabel 3-3. Ook is in deze tabel de sedimentverdeling aangegeven die is afgeleid uit metingen door Ten Brinke (2001). Het sedimenttransport op de Bovenrijn werd in het originele model overschat. In het nieuwe model is het sedimenttransport op de Bovenrijn lager door een verlaging van de vermenigvuldigingsfactor in de transportformule om een betere weergave van de voortplantingssnelheid te realiseren. De grootte van het transport is daardoor juist lager dan de waarde van Ten Brinke. Deze reductie is in het verleden (onder ander voor het Grensproject) noodzakelijk gebleken voor een realistische simulatie van tijdsafhankelijke morfologische processen. Ook voor de Waal geldt deze aanpassing, maar voor de Nederrijn en IJssel zijn de transporten juist weer groter dan volgens de sedimentbalans van Ten Brinke zou gelden. Ook hiervoor geldt dat het voor een goede overeenstemming van het gesimuleerde tijdsafhankelijke gedrag van de bodem (voortplantingssnelheid e.d.) het in deze takken kennelijk noodzakelijk is van de getallen van Ten Brinke af te wijken. Verder kan worden geconstateerd dat de verdeling van sediment vooral op de IJsselkop procentueel gezien in het nieuwe model beter overeen komt met de verdeling volgens de sedimentbalans van Ten Brinke (2001) dan de sedimentverdeling in het originele model.

	Origineel model		Nieuw model		Sedimentbalans (Ten Brinke, 2001)	
Pannerdensch Kop	Bovenrijn - uit 955.000		Bovenrijn - uit 342.000		Bovenrijn - uit 577.000	
	Waal - in 830.000 87%	PK - in 125.000 13%	Waal - in 280.000 82%	PK - in 62.000 18%	Waal - in 507.000 88%	PK - in 70.000 12%
	PK - uit 176.000		PK - uit 179.000		PK - uit 97.000	
IJsselkop	IJssel - in 95.000 54%	Nederrijn - in 81.000 46%	IJssel - in 64.000 36%	Nederrijn - in 115.000 64%	IJssel - in 37.000 38%	Nederrijn - in 60.000 62%

Tabel 3-3. Sedimentverdeling op basis van jaartransporten op de Pannerdensch Kop en IJsselkop.

- Niet-lineariteitparameter in de sedimenttransportformule: Uit de simulatie met het originele Rijntakkenmodel blijkt dat de niet-lineariteitparameter  $n$  op alle Rijntakken regelmatig kleiner is dan 4. Door de kritische Shieldsparameter op de Niederrhein & Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de IJssel te verhogen is de niet-



lineariteitparameter toegenomen, zie Bijlage E. Voor de Nederrijn en de Lek is de niet-lineariteitparameter conform de Engelund & Hansen transportformule gelijk aan 5.

### 3.3 Modelverificatie

#### 3.3.1 Verificatieperiode 1950-1970

De belangrijke aanpassing in de modelschematisatie ten opzichte van het kalibratiemodel is de verwijdering van de stuwen in de Nederrijn en Lek en de verwijdering van de vaste lagen in de Waal. In Bijlage F zijn de trajectgemiddelde waarden voor de morfologische grootheden voor zowel de berekeningen als de metingen gegeven. De bodemhellingen en de lokale afwijkingen in de tijdsgemiddelde bodemgradiënten per km worden redelijk goed voorspeld met zowel het originele als het nieuwe model. De discussie van de resultaten van de eerste verificatieperiode richt zich daarom met name op de verschillen in afgeleide jaarlijkse bodemveranderingen en voortplantingssnelheden tussen het originele model, het nieuwe model en de metingen.

De verschillen in modelschematisatie tussen het kalibratie- en het verificatiemodel dragen bij aan een matige modelperformance van met name de Nederrijn & Lek. In het vrijafstromende verificatiemodel zonder afvoerregulatie door stuwen komt de morfologische ontwikkeling (jaarlijkse bodemveranderingen en voortplantingssnelheden) in zowel het originele als het nieuwe model niet overeen met de metingen. Uit de betreffende figuur in Bijlage F voor de Nederrijn en Lek blijkt dat de berekende bodemhelling afneemt in de periode 1950-1970, terwijl dit in werkelijkheid niet is opgetreden. Dit duidt op een te laag aanbod van sediment naar deze tak in verhouding tot de berekende sedimentcapaciteit van deze tak. Wanneer er minder sediment binnenkomt dan er verder wordt getransporteerd zal in de loop van de tijd de bodem geleidelijk dalen en de bodemhelling afnemen. Het aanbod van sediment wordt bepaald door de splitsingspuntrelatie, en de ontwikkeling van de afvoerverdeling in de tijd. De transportcapaciteit in de riviertak wordt bepaald door parameters zoals de stroomsnelheid, de bodemsamenstelling en hydraulische ruwheid. De toename van de afvoer door het verwijderen van de stuwen leidt tot hogere stroomsnelheden in de Nederrijn en Lek (en dus een hogere transportcapaciteit), maar ook tot een groter aanbod van sediment op het splitsingspunt. Het is dus bij voorbaat uit bodemverschilfiguren niet duidelijk te stellen of de afwijkingen zijn toe te schrijven aan een onjuiste splitsingspuntverdeling of een onjuiste transportberekening.

Echter, uit de figuren voor voortplantingssnelheden blijkt dat deze in de berekening voor de verificatieperiode in de Nederrijn en Lek aanzienlijk hoger is dan de metingen. Dit wordt veroorzaakt door een overschatting van de berekende sedimenttransporten. Een mogelijke oorzaak van de verhoogde transporten is de invloed van bodemsamenstelling. De berekeningen voor 1950-1970 zijn uitgevoerd met de bodemsamenstelling uit het geijkte model die zijn gebaseerd op metingen in de jaren 90. Ten gevolge van de constructie van de stuwen is het echter aannemelijk dat de bodemsamenstelling is verfijnd, ten opzichte van de situatie voor aanleg van de stuwen. Een fijne bodemsamenstelling leidt tot een hogere sedimenttransportcapaciteit.

De lengte van de Nederrijn en Lek is door aanleg van de stuwen gereduceerd, waardoor de bodemhelling toeneemt. Voor de aanleg was de lengte dus groter. Dit is wel meegenomen in de metingen, maar niet in de modelaanpassingen en kan ook gedeeltelijk de verschillen verklaren.

Overeenkomstig met de kalibratiefase, worden de voortplantingssnelheden en de jaarlijkse bodemveranderingen op de Bovenrijn en de Waal beter voorspeld met het nieuwe model dan met het originele model. De morfologische grootheden afgeleid uit de nieuwe modelberekeningen komen goed overeen met de waarnemingen. Een uitzondering hierop is de morfologische ontwikkeling op de Beneden-Waal (traject 4). Vanaf km 935 wordt met beide modellen de aanzanding met een factor 3-4 overschat ten opzichte van de waarnemingen. De effecten van een aantal veranderingen in het systeem zijn mogelijk niet correct weergegeven in het model. Tot begin jaren '70 vond het baggerwerk redelijk ongecontroleerd en ongelimiteerd plaats. Dit heeft een nauwkeurige en volledige registratie van deze werkzaamheden beperkt. Daarnaast heeft de afsluiting van het Haringvliet een groot effect gehad op het systeem, welke niet is meegenomen in de modelschematisatie.

Met name op het bovenstroomse traject van de IJssel wordt de bodemontwikkeling beter voorspeld met het nieuwe model dan met het originele model. Het originele model voorspelt te veel erosie. Door de aanwezigheid van een afpleisterlaag op dit traject wordt in werkelijkheid de erosie beperkt. Op de Midden-IJssel wordt met beide modellen te veel erosie voorspeld in vergelijking tot de waarnemingen. De voortplantingssnelheid op de Boven-IJssel komt beter overeen met de metingen voor het originele model, terwijl het nieuwe model beter voldoet op de Midden-IJssel en de Beneden-IJssel.

### **3.3.2 Verificatieperiode 1970-1990**

De trajectgemiddelde waarden voor de morfologische grootheden zijn voor de berekeningen met het originele en nieuwe model en de metingen zijn voor de verificatieperiode 1970-1990 gegeven in Bijlage G. Uit de modelschematisatie zijn voor deze verificatieperiode alleen de vaste lagen uit het model verwijderd. Hierdoor zijn de resultaten in vergelijking tot de verificatieperiode 1950-1970 met name op de Nederrijn & Lek een stuk beter.

De voortplantingssnelheden en de jaarlijkse bodemveranderingen op de Bovenrijn & Waal in het nieuwe model vertonen een grote overeenkomst met de metingen. Het originele model overschat de voortplantingssnelheden op deze takken met een factor van ongeveer 2. De jaarlijkse bodemveranderingen worden met het originele model minder goed voorspeld dan met het nieuwe model. Voor beide modellen wordt erosie op de Waaltrajecten in vergelijking tot de metingen overschat.

Op de Nederrijn en Lek zijn met het nieuwe model verbeteringen gerealiseerd ten aanzien van zowel de voortplantingssnelheden als de jaarlijkse bodemveranderingen. Niet alleen de trajectgemiddelde waarden komen beter overeen met de metingen, ook het verloop van de jaarlijkse bodemveranderingen langs de rivier wordt beter weergegeven.

Voor het originele en het nieuwe model vertonen de jaarlijkse bodemveranderingen op de IJssel een goede overeenkomst met de metingen. De voortplantingssnelheden worden beter voorspeld met het nieuwe model.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Het doel van deze studie was het 1-D Rijntakkenmodel te verbeteren door de kalibratie op nieuw uit te voeren gericht op een betere representatie van een aantal karakteristieke morfologische parameters waarmee het morfologische gedrag van de Rijntakken kan worden beschreven. Deze morfologische parameters zijn op basis van de methode van Sieben (2005) afgeleid uit jaarlijkse dwarspeilingen (JDP) in de periode 1950-1990.

Tijdens de kalibratie zijn parameters van de sedimenttransportformule, de empirische splitsingspuntrelatie en het ruimtelijk verloop van de korreldiameter aangepast. De kalibratie en verificatie laten een duidelijke verbetering zien met betrekking tot zowel de grootschalige trends in de bodemligging als de trends in de lokale bodemvariaties. Met name voorspellingen ten aanzien van de jaarlijkse bodemveranderingen en de voortplantingssnelheden van lokale bodemverstoringen zijn verbeterd. Op de Niederrhein & Bovenrijn en de riviertrajecten nabij de splitsingspunten zijn in werkelijkheid gegradeerd-sedimentprocessen bepalend voor het morfologische gedrag. Onder andere door aanpassingen in het ruimtelijk verloop van de korreldiameter komen de morfologische voorspellingen met het nieuwe model beter overeen met de metingen, maar voor een goede representatie van het morfologische gedrag, de uitzeving van sedimentfracties op en de afpleisterlagen nabij splitsingspunten, zouden deze processen eigenlijk in het model moeten worden opgenomen.

Naast deze morfologische parameters is ook gekeken naar de niet-lineariteitparameter  $n$  in de sedimenttransportformule die van belang is voor een goede effectbepaling van rivierkundige ingrepen. Omdat voor een goede beschrijving van morfologische veranderingen de gradiënten in het sedimenttransport cruciaal zijn, is tijdens de kalibratie naar een realistische waarde van  $n$  gestreefd. Fysisch wordt het niet-lineaire gedrag van deze transporten op de Nederlandse Rijntakken correct beschreven met een parameter  $n$  tussen de 4 en 6. In het originele model is de niet-lineariteitparameter  $n$  op alle Rijntakken regelmatig kleiner dan 4. Het nieuwe model voldoet wel beter aan de streefwaarde voor  $n$ .

De stabiliteit van de splitsingspunten is onderzocht aan de hand van het tijdsafhankelijke gedrag van bodemsprongen en trajectgemiddelde bodemliggingen rond de Pannerdensche Kop en de IJsselkop. De modelberekeningen laten nog steeds verschillen zien tussen het voorspelde en waargenomen morfologische gedrag. Gegradeerd-sediment processen spelen rond de splitsingspunten een grote rol, die momenteel niet in het model worden beschouwd. Het is mogelijk deze processen met SOBEK te berekenen. Op korte termijn zal in een vervolgproject de schematisatie van het Rijntakkenmodel worden uitgebreid naar een gegradeerd sedimentmodel.

## 5 Literatuur

Baur, T. & Sloff, S., 2003. *Calibration 2D model Rijn*. Memo ZWS0471/Q2496/am. WL Delft Hydraulics.

Jesse, P. & Kroekenstoel, D.F., 2001. *I-D Morfologisch model Rijntakken*. RIZA rapport 2001.040. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Kroekenstoel, D.F., 2004. *Morfologische berekeningen t.b.v. PKB Ruimte voor de Rivieren*. Memo WSR 2004-023. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Schropp, M.H.I., 2000. Trends in de afvoerverdeling bij laagwater. RIZA rapport 2000.043. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Sieben, A., 2004.. *Morfologische effecten van herinrichting, PKB ruimte voor de rivier*. Werkdocument 2005.044x Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Sieben, A., 2006. *Empirische bepaling invloed afvoer op sedimentverdeling bij splitsingspunten*. Memo 2006.003. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Ten Brinke, W.B.M., 2000. *CDrom 'Bodemligging en baggergegevens 1900-2000'*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Ten Brinke, W.B.M., Bolwidt, L.J., Snippen, E. & Van Hal, L.W.J., 2001. *Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand, grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland*. RIZA rapport 2001.043. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Van der Veen, R. & Dirksen, F., 2004. *Aanpassing stuwformulering SOBEK-Rijn*. Memo WRS 2004-2(A). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Van der Veen, R., Pakes, U., & Schutte, L., 2002. *Bouw en calibratie SOBEK-Rijn. Versie 2000.1 t/m 2000.3*. RIZA rapport 2002.039. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

Vreugdenhil, C.B. & De Vries, M., 1973. *Analytical approaches to non-steady bedload transport*. DHL Res. report S 78-IV.

Wang, Z.B. & Van der Kraaij, Th., 1994. *Morphodynamic development of secondary channel system along Rhine branches in the Netherlands*. Q1963. WL Delft Hydraulics.

# **Bijlagen**

## A Morfologische parameters afgeleid uit JDP

Trajectgemiddelde waarden en km-gemiddelde waarden van de karakteristieke morfologische parameters zijn voor de kalibratie (1990-2000) en verificatieperioden (1950-1970 en 1970-1990) bepaald uit de km-gemiddelde waarden van de Jaarlijkse Dwarspeilingen. De parameters staan gegeven in onderstaande tabellen. Aangezien vanaf 1987 jaarlijkse dwarspeilingen niet altijd meer hebben plaatsgevonden in het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn en de Lek zijn voor de kalibratieperiode op deze riviertakken de peilingen tussen 1980 en het jaar waarin de peilingen nog wel beschikbaar (varieert tussen 1987 en 1994) waren gebruikt.

Riviertraject	km-raai	Bodemhelling [m/km]			Jaarlijkse bodemverandering [m/jaar]		
		1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000
Bovenrijn	859-867	0.08	0.07	0.10	-0.03	-0.03	-0.01
Boven-Waal	868-886	0.10	0.08	0.08	-0.02	-0.02	-0.03
Midden-Waal	887-915	0.11	0.12	0.11	-0.01	-0.01	-0.01
Beneden-Waal	916-951	0.11	0.10	0.11	0.00	-0.01	-0.01
Pannerdensch Kanaal	868-879	0.06	0.03	0.03	-0.02	-0.04	-0.03
Nederrijn, 1ste stuwpand	880-891	0.12	0.06	0.07	-0.01	-0.01	-0.02
Nederrijn, 2de stuwpand	892-922	0.09	0.11	0.11	-0.01	-0.02	-0.02
Nederrijn, 3de stuwpand	923-947	0.12	0.12	0.12	-0.03	0.00	0.01
Lek	948-989	0.08	0.06	0.05	0.00	-0.02	-0.02
Boven-IJssel	880-930	0.12	0.11	0.10	0.01	-0.01	0.01
Midden-IJssel	931-970	0.07	0.06	0.06	0.02	-0.02	0.01
Beneden-IJssel	971-1000	0.04	0.03	0.04	0.01	0.00	-0.01

Tabel 1. Overzicht trends in traject-gemiddelde bodemhelling en jaarlijkse bodemveranderingen.

Riviertraject	km-raai	Voortplantingssnelheid [km/jaar]			Ruimtelijke standaardafwijking in bodemgradiënt [m/km]		
		1950-1970	1970-1990	1990-2000*	1950-1970	1970-1990	1990-2000
Bovenrijn	859-867	0.88	1.10	1.12	0.16	0.23	0.26
Boven-Waal	868-886	1.02	1.22	1.04	0.22	0.23	0.25
Midden-Waal	887-915	1.07	1.15	1.13	0.13	0.14	0.13
Beneden-Waal	916-951	1.12	1.25	1.1	0.16	0.21	0.18
Pannerdensch Kanaal	868-879	0.72	0.85	0.97	0.28	0.31	0.34
Nederrijn, 1ste stuwpand	880-891	0.88	0.96	0.77	0.28	0.27	0.28
Nederrijn, 2de stuwpand	892-922	1.46	1.71	1.17	0.24	0.23	0.23
Nederrijn, 3de stuwpand	923-947	1.13	1.27	1.03	0.27	0.32	0.30
Lek	948-989	1.08	0.99	0.96	0.42	0.37	0.31
Boven-IJssel	880-930	1.42	1.71	1.5	0.19	0.24	0.23

Midden-IJssel	931-970	1.12	1.42	1.16	0.19	0.21	0.19
Beneden-IJssel	971-1000	0.96	1.26	1.06	0.26	0.22	0.23

\* voor de kalibratieperiode zijn de voortplantingsnelheden bepaald over de periode 1973-1990, omdat de voortplantingsnelheden over de periode 1990-2000 erg laag uitvielen op o.a. de Bovenrijn en Waal

Tabel 2. Overzicht trends in traject-gemiddelde voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen en ruimtelijke standaardafwijking in bodemgradiënt.

km-raai	Bodemhelling [m/km]			Jrl. bodemveranderingen [m/jaar]			Voortplantingssnelheden [km/jaar]		
	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000
859	-0.16	-0.34	-0.30	-0.02	-0.01	0.00	0.88	1.78	0.64
860	-0.17	-0.08	-0.15	-0.02	-0.02	0.01	0.77	2.46	0.78
861	-0.22	-0.28	-0.33	-0.03	-0.02	-0.01	0.74	0.95	1.25
862	-0.10	-0.30	-0.42	-0.03	-0.02	-0.02	1.00	0.86	0.25
863	0.05	-0.05	-0.11	-0.03	-0.03	0.00	1.03	1.02	1.26
864	-0.25	-0.26	-0.32	-0.02	-0.04	-0.01	0.70	1.28	1.33
865	-0.07	0.05	-0.03	-0.02	-0.06	-0.01	0.84	1.62	0.93
866	0.06	0.11	0.14	-0.03	-0.06	-0.02	0.98	1.38	0.46
867	0.12	0.21	0.22	-0.03	-0.06	-0.01	0.84	0.64	0.70
868	0.20	0.25	0.27	-0.02	-0.03	-0.03	1.16	1.51	0.69
869	-0.21	-0.47	-0.41	-0.02	-0.01	-0.04	1.26	0.81	0.59
870	0.20	0.22	0.22	-0.02	-0.02	-0.04	1.32	1.01	1.19
871	-0.23	-0.12	-0.26	0.00	-0.01	-0.01	0.95	0.71	0.58
872	-0.15	-0.06	-0.01	-0.01	-0.03	-0.03	1.40	0.98	1.04
873	-0.20	-0.20	-0.19	-0.02	-0.02	-0.03	0.53	1.08	1.02
874	-0.01	0.07	-0.17	-0.01	-0.01	-0.05	1.02	2.42	1.42
875	-0.23	-0.20	-0.04	-0.01	-0.03	-0.04	0.83	1.38	0.45
876	-0.08	-0.13	-0.14	0.00	-0.05	-0.05	1.05	1.37	1.07
877	-0.10	-0.05	0.05	-0.01	-0.02	-0.05	0.97	1.42	0.38
878	0.06	-0.01	0.03	-0.02	-0.04	-0.05	1.41	0.75	1.30
879	-0.29	-0.28	-0.27	-0.02	-0.02	-0.02	0.74	0.96	0.95
880	-0.17	-0.09	-0.12	-0.01	-0.02	-0.04	0.61	1.09	0.61
881	0.03	0.09	0.05	-0.01	-0.04	-0.02	1.00	1.18	1.39
882	-0.31	-0.33	-0.30	-0.01	-0.03	-0.02	0.84	1.21	0.93
883	0.24	0.15	0.27	-0.01	-0.03	-0.04	1.31	1.18	1.32
884	-0.09	0.01	0.10	-0.01	-0.01	-0.02	1.17	2.13	0.62
885	-0.31	-0.36	-0.44	0.02	-0.02	-0.03	0.97	0.46	0.84
886	-0.27	-0.26	-0.19	-0.01	0.00	-0.01	0.78	1.49	0.88
887	-0.10	-0.11	-0.11	0.00	-0.03	-0.01	1.28	1.80	2.11
888	-0.13	-0.04	-0.12	0.00	-0.05	0.00	0.82	0.91	1.13
889	-0.17	-0.24	-0.24	0.00	-0.03	0.02	1.15	1.40	1.45

890	-0.11	-0.11	-0.22	0.01	-0.03	0.00	0.86	1.59	0.89
891	-0.12	-0.05	-0.04	0.00	-0.01	-0.01	0.89	1.01	0.90
892	-0.14	-0.15	-0.08	0.01	-0.01	-0.01	0.98	1.13	1.30
893	-0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	-0.02	1.32	1.16	1.22
894	-0.18	-0.19	-0.20	0.00	-0.02	-0.02	0.93	1.12	0.62
895	-0.05	-0.09	-0.05	0.00	-0.01	-0.03	1.04	0.65	1.43
896	-0.13	-0.13	-0.15	0.02	-0.01	0.00	1.19	0.86	0.68
897	-0.01	0.06	0.06	0.01	-0.01	-0.02	0.99	1.27	0.97
898	-0.10	-0.15	-0.10	0.01	0.00	-0.02	1.05	1.03	0.67
899	-0.02	0.06	0.07	-0.01	-0.01	-0.02	0.94	1.81	1.86
900	-0.18	-0.21	-0.22	0.01	0.01	-0.04	0.97	1.51	0.99
901	-0.19	-0.18	-0.13	0.00	-0.01	-0.01	0.94	0.92	0.78
902	-0.20	-0.12	-0.09	0.01	0.00	-0.04	1.05	0.79	0.95
903	-0.17	-0.22	-0.28	0.00	0.01	-0.04	1.69	1.29	1.91
904	-0.05	-0.05	-0.06	0.01	-0.02	-0.03	0.94	1.06	1.22
905	-0.23	-0.13	-0.06	-0.01	0.00	-0.03	1.03	1.26	0.91
906	0.05	-0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.02	1.69	1.72	0.50
907	-0.05	0.03	0.06	-0.01	-0.01	-0.01	1.03	0.81	1.68
908	-0.16	-0.18	-0.25	0.00	0.02	-0.02	1.01	1.08	0.51
909	-0.13	-0.21	-0.19	-0.01	0.00	0.00	0.68	1.02	0.88
910	-0.14	-0.16	-0.10	-0.01	0.03	-0.02	1.09	1.24	1.52
911	-0.10	-0.17	-0.14	-0.01	0.00	0.00	0.89	0.77	0.87
912	-0.04	-0.10	-0.19	0.00	-0.02	0.00	1.00	1.14	0.84
913	-0.30	-0.23	-0.19	0.00	-0.03	0.01	1.20	1.20	1.01
914	-0.07	-0.18	-0.22	0.00	-0.03	0.00	1.25	1.21	0.94
915	-0.03	0.05	0.04	-0.01	0.00	0.01	1.12	0.69	0.54
916	-0.23	-0.14	-0.16	-0.01	-0.01	0.02	0.88	0.74	1.16
917	0.01	-0.13	-0.12	-0.01	0.00	-0.01	1.45	1.18	1.24
918	-0.08	-0.06	-0.07	-0.01	-0.01	0.00	1.50	1.51	1.29
919	-0.29	-0.24	-0.18	-0.01	0.00	0.01	0.81	1.93	1.69
920	-0.06	-0.09	-0.11	0.00	0.01	0.00	1.30	1.27	1.01
921	-0.25	-0.23	-0.19	-0.01	-0.01	0.00	1.26	1.44	1.21
922	-0.01	0.01	-0.07	-0.01	-0.01	0.01	0.94	1.05	1.08
923	-0.03	-0.07	-0.23	-0.01	-0.02	0.01	1.48	0.88	1.22
924	-0.31	-0.19	-0.18	-0.01	-0.02	-0.02	1.22	1.34	1.40
925	0.06	0.07	0.07	-0.06	0.00	-0.05	0.94	0.82	1.27
926	-0.07	-0.15	-0.19	-0.05	0.01	0.00	1.18	1.20	1.59
927	-0.39	-0.18	0.01	-0.06	0.01	0.01	1.12	0.94	1.18
928	-0.10	-0.15	-0.24	-0.01	0.00	0.01	1.33	0.91	0.88



929	-0.01	-0.01	-0.25	-0.01	-0.02	-0.04	1.41	0.67	1.17
930	0.18	0.17	-0.13	0.00	0.00	-0.03	1.53	0.89	0.80
931	-0.18	-0.05	0.08	0.00	-0.02	-0.07	1.15	1.49	0.84
932	-0.30	-0.31	-0.24	0.00	-0.02	-0.04	1.80	1.09	1.94
933	-0.11	-0.77	-0.43	0.00	-0.02	-0.06	1.31	1.07	0.83
934	-0.17	0.05	0.06	0.01	-0.07	-0.01	0.92	1.41	0.59
935	-0.03	0.40	0.24	0.01	-0.07	0.00	1.52	0.49	0.97
936	-0.05	0.11	0.23	0.01	-0.02	-0.04	0.46	0.96	0.52
937	-0.12	-0.31	-0.16	0.02	0.00	-0.01	0.91	1.21	0.62
938	-0.08	-0.10	-0.12	0.01	-0.02	0.00	0.74	1.06	0.78
939	-0.15	-0.03	-0.06	-0.01	-0.02	0.01	0.85	0.94	0.87
940	0.07	0.00	0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.62	1.64	1.00
941	-0.19	-0.18	-0.16	0.01	-0.02	0.01	0.81	1.11	0.76
942	-0.13	-0.09	-0.09	0.02	-0.03	0.03	0.96	1.03	1.30
943	-0.06	-0.02	-0.22	0.01	-0.02	0.01	1.41	1.48	0.56
944	-0.14	-0.16	-0.08	0.01	-0.01	-0.01	0.97	0.69	0.99
945	-0.10	-0.09	-0.08	0.01	-0.02	0.01	0.96	1.48	0.86
946	-0.16	-0.12	-0.14	0.00	-0.02	-0.01	0.79	1.28	1.06
947	0.01	0.05	-0.02	0.01	-0.01	-0.01	1.33	1.94	1.68
948	-0.06	-0.09	0.11	0.01	-0.02	-0.02	1.19	3.24	0.72
949	-0.23	-0.18	-0.23	0.01	-0.02	0.00	1.14	1.54	1.51
950	-0.16	-0.14	-0.31	0.02	0.01	-0.02	1.49	2.03	0.99
951	-0.14	-0.20	-0.20	0.02	0.01	-0.02	0.74	0.97	0.69

Tabel 3. Overzicht bodemhelling, jaarlijkse bodemveranderingen en voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen per km-raai in de Bovenrijn en Waal.

km-raai	Bodemhelling [m/km]			Jrl. bodemveranderingen [m/jaar]			Voortplantingssnelheden [km/jaar]		
	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000
869	-0.35	-0.46	-0.58	-0.01	-0.05	-0.01	0.70	0.55	1.29
870	0.08	0.29	0.29	-0.03	-0.03	-0.02	0.66	0.76	0.70
871	-0.38	-0.41	-0.35	0.02	-0.03	-0.04	0.65	1.09	1.30
872	-0.02	0.13	0.18	-0.01	-0.02	-0.04	0.61	0.60	0.74
873	-0.27	-0.18	-0.22	-0.01	-0.04	-0.02	0.67	0.77	0.68
874	0.09	0.08	0.14	-0.02	-0.04	-0.04	0.75	1.22	1.51
875	-0.23	-0.19	-0.19	-0.03	-0.03	-0.03	1.20	1.15	1.45
876	0.05	0.00	0.00	-0.04	-0.04	-0.03	0.88	0.90	1.85
877	-0.26	-0.17	-0.11	-0.01	-0.03	-0.02	0.57	0.76	1.36
878	0.19	0.22	0.23	-0.02	-0.02	-0.03	0.64	0.76	1.66
879	0.38	0.45	0.51	-0.03	-0.02	-0.02	0.60	0.77	1.33

880	-0.07	-0.12	-0.21	-0.04	-0.01	-0.01	1.03	1.31	0.68
881	0.06	-0.07	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	0.79	1.43	1.27
882	-0.16	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	0.93	0.50	0.60
883	-0.05	-0.22	-0.27	-0.03	0.00	-0.02	0.96	0.68	0.50
884	-0.28	-0.21	-0.18	0.00	-0.04	-0.01	0.93	1.03	1.81
885	-0.20	-0.13	-0.13	-0.01	-0.02	-0.02	1.19	0.98	0.99
886	-0.37	0.07	0.05	-0.01	-0.02	-0.02	0.90	NaN	NaN
887	0.27	0.10	0.13	-0.01	0.01	-0.02	1.14	NaN	NaN
888	-0.49	-0.42	-0.37	-0.02	-0.01	-0.02	0.82	NaN	NaN
889	-0.17	0.04	0.11	0.00	0.00	-0.03	0.94	0.96	1.25
890	-0.14	-0.03	-0.12	0.03	-0.01	-0.02	0.61	0.74	0.98
891	0.02	-0.28	-0.37	0.03	0.01	-0.02	0.30	1.02	0.82
892	0.57	-0.29	-0.26	0.00	0.04	-0.03	0.61	0.54	0.95
893	0.02	-0.31	-0.27	0.00	0.01	-0.05	0.93	1.44	0.84
894	-0.22	-0.16	-0.14	-0.08	-0.01	-0.02	0.59	2.12	0.93
895	-0.17	-0.22	-0.30	-0.03	-0.05	-0.01	2.48	0.86	2.15
896	-0.19	-0.06	-0.09	-0.01	-0.03	-0.02	1.36	2.39	1.10
897	-0.08	-0.12	-0.19	-0.02	-0.03	-0.04	2.27	1.34	0.81
898	0.02	0.10	0.12	0.00	-0.05	-0.05	1.06	1.15	0.73
899	-0.28	-0.31	-0.38	-0.02	-0.04	-0.01	0.89	1.16	1.31
900	-0.09	-0.15	-0.20	-0.01	-0.07	-0.03	1.04	1.36	2.23
901	-0.08	0.19	0.33	0.00	-0.08	-0.06	1.58	0.78	2.01
902	-0.23	-0.30	-0.25	0.00	-0.06	-0.05	0.96	1.28	1.32
903	0.20	0.09	-0.05	-0.01	-0.05	-0.02	0.62	0.65	1.57
904	-0.38	0.00	0.25	0.01	-0.06	-0.04	0.85	0.63	0.93
905	-0.20	-0.01	0.07	0.00	-0.03	-0.02	1.23	0.91	1.22
906	-0.14	-0.01	0.06	0.01	-0.02	-0.03	0.69	1.20	1.45
907	0.05	-0.12	-0.11	0.02	-0.02	-0.02	1.04	1.43	2.47
908	-0.23	-0.16	-0.16	0.01	-0.02	0.00	1.04	1.02	0.99
909	-0.15	-0.09	-0.10	0.00	-0.02	0.00	0.81	NaN	NaN
910	-0.10	-0.08	-0.09	-0.01	-0.01	-0.01	1.70	NaN	NaN
911	-0.08	-0.16	-0.21	-0.01	-0.01	0.00	0.95	1.83	0.75
912	-0.23	-0.27	-0.32	-0.01	-0.01	-0.02	2.20	1.68	1.28
913	-0.14	-0.06	0.04	-0.01	-0.02	-0.02	2.08	1.56	1.26
914	-0.02	-0.05	-0.06	-0.01	0.00	-0.01	2.35	2.88	1.76
915	-0.21	-0.23	-0.26	-0.02	0.00	-0.02	3.48	2.95	2.01
916	-0.02	0.07	0.15	-0.01	-0.01	-0.02	2.13	2.21	2.10
917	-0.10	-0.20	-0.28	0.00	0.00	-0.01	2.42	2.04	2.00
918	-0.42	-0.50	-0.45	-0.01	-0.02	-0.04	3.78	2.79	2.06

919	-0.25	-0.26	-0.26	-0.01	-0.02	-0.02	1.83	2.85	1.02
920	0.24	0.39	0.39	0.00	-0.02	-0.02	1.00	3.14	1.46
921	-0.14	-0.15	-0.09	0.00	-0.02	-0.01	0.64	2.49	1.10
922	-0.34	-0.59	-0.61	-0.01	-0.01	-0.02	0.69	2.92	1.48
923	-0.12	-0.18	-0.22	-0.03	-0.01	-0.01	1.07	0.53	0.68
924	-0.09	-0.27	-0.25	-0.05	-0.01	-0.01	1.11	2.00	2.07
925	-0.07	-0.05	0.14	0.00	0.01	0.00	0.65	1.63	2.17
926	-0.01	NaN	NaN	-0.01	0.02	0.01	0.66	NaN	NaN
927	-0.21	NaN	NaN	-0.01	NaN	NaN	1.54	NaN	NaN
928	-0.27	NaN	NaN	-0.03	NaN	NaN	1.11	NaN	NaN
929	0.17	0.02	-0.02	-0.06	0.01	0.01	0.81	0.87	0.59
930	-0.02	0.05	-0.02	-0.05	0.01	0.03	1.64	0.94	1.23
931	-0.27	-0.17	-0.17	-0.04	0.01	0.02	1.53	0.93	0.89
932	0.27	0.01	-0.07	-0.04	0.01	0.01	0.55	0.79	1.10
933	-0.14	0.44	0.45	-0.01	-0.02	0.02	1.25	0.39	0.35
934	-0.45	-0.81	-0.78	-0.01	0.00	0.00	0.56	1.03	0.79
935	-0.13	-0.18	-0.15	-0.03	0.00	0.01	1.23	1.59	0.71
936	0.05	0.11	0.04	-0.02	-0.01	0.02	1.25	1.52	1.33
937	0.17	0.42	0.44	-0.01	-0.01	-0.01	1.05	1.11	1.51
938	-0.40	-0.40	-0.47	-0.02	0.00	-0.01	1.03	0.82	0.55
939	-0.28	-0.38	-0.40	-0.02	-0.01	-0.03	1.86	1.21	0.90
940	0.16	0.16	0.20	-0.03	-0.02	-0.03	1.04	0.98	0.88
941	-0.42	-0.28	-0.27	-0.02	-0.01	-0.02	1.82	1.36	1.61
942	0.08	0.10	0.15	-0.04	0.00	-0.02	1.53	1.29	2.91
943	-0.08	-0.04	-0.04	-0.02	0.00	-0.01	1.36	1.88	1.57
944	-0.23	-0.47	-0.43	-0.02	-0.01	-0.02	1.13	1.58	1.45
945	-0.22	-0.21	-0.26	-0.05	0.00	-0.02	1.60	2.44	2.92
946	-0.43	-0.17	-0.17	-0.02	-0.01	-0.01	0.49	1.74	2.26
947	-0.06	-0.38	-0.35	-0.01	0.02	0.00	0.52	1.28	0.96
948	-0.14	-0.19	-0.17	0.01	0.01	-0.02	0.68	0.84	1.33
949	-0.35	NaN	NaN	-0.05	-0.01	0.00	0.58	NaN	NaN
950	-0.32	NaN	NaN	-0.03	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
951	0.15	0.43	0.34	-0.04	-0.02	-0.04	NaN	NaN	NaN
952	0.03	0.19	0.23	-0.05	-0.01	-0.03	NaN	NaN	NaN
953	0.01	-0.16	-0.23	0.01	-0.01	-0.03	NaN	NaN	NaN
954	-0.07	-0.01	-0.07	0.03	-0.04	-0.03	0.97	0.84	1.74
955	0.10	0.04	0.01	0.03	-0.03	-0.02	1.50	1.63	1.69
956	-0.24	-0.13	-0.16	0.01	-0.02	-0.02	0.51	1.38	1.18
957	0.00	-0.23	-0.25	0.00	-0.02	0.03	1.09	1.53	2.19

958	0.02	0.06	0.00	-0.01	-0.03	0.02	1.17	0.49	0.21
959	-0.13	-0.06	0.04	0.00	-0.04	-0.06	NaN	NaN	NaN
960	0.08	0.18	0.18	0.01	-0.04	-0.02	NaN	NaN	NaN
961	-0.22	-0.11	-0.19	-0.03	-0.03	-0.04	0.95	1.03	2.61
962	-0.07	-0.16	-0.14	0.00	-0.04	-0.03	2.60	1.06	2.82
963	-0.24	-0.24	-0.24	0.00	-0.05	-0.05	0.74	1.09	1.39
964	0.04	-0.06	0.08	0.00	-0.05	-0.05	0.49	1.09	1.32
965	-0.05	0.05	-0.03	-0.01	-0.02	-0.01	NaN	NaN	NaN
966	0.29	0.18	0.15	-0.01	-0.02	0.00	NaN	NaN	NaN
967	-0.08	-0.06	-0.15	-0.01	-0.02	-0.01	NaN	NaN	NaN
968	-0.28	0.04	0.14	0.00	-0.04	-0.05	NaN	NaN	NaN
969	-0.32	-0.28	-0.14	0.01	-0.03	-0.06	0.79	1.53	2.69
970	0.04	0.02	0.05	0.01	-0.01	-0.03	1.27	1.18	0.66
971	0.23	0.25	0.20	0.01	0.00	-0.02	0.89	1.52	0.88
972	-0.06	0.05	0.11	0.01	-0.01	-0.02	1.20	0.74	0.85
973	0.03	0.05	-0.01	0.01	0.01	0.00	1.85	0.87	1.30
974	-0.34	-0.40	-0.36	0.01	0.01	0.01	0.60	0.98	0.41
975	0.23	-0.16	-0.39	0.00	0.01	0.01	0.51	0.46	2.56
976	-0.40	-0.03	0.26	-0.02	-0.03	-0.03	0.65	0.27	1.22
977	0.09	-0.01	-0.02	0.00	0.02	0.02	1.31	0.59	0.59
978	-0.62	-0.59	-0.75	0.02	0.00	0.05	1.00	0.40	0.79
979	-0.07	0.10	0.15	0.03	-0.01	-0.01	1.27	0.87	1.78
980	1.17	0.97	1.03	0.01	0.00	-0.02	0.69	1.00	1.64
981	-0.71	-0.76	-0.82	-0.02	0.01	0.03	0.79	1.29	1.34
982	-0.60	-0.33	-0.24	0.00	-0.01	0.00	0.94	0.81	0.96
983	0.66	0.63	0.55	0.02	0.02	0.07	1.10	1.12	0.65
984	-0.49	-0.48	-0.38	0.02	0.00	0.03	0.69	0.51	0.64
985	0.35	0.52	0.47	0.00	0.02	0.01	1.72	1.45	0.48
986	0.30	0.12	0.06	0.00	0.02	0.00	1.47	0.75	1.41
987	-0.64	-0.68	-0.70	0.02	0.00	0.00	1.20	1.30	1.60
988	-1.14	-0.95	-0.84	0.01	0.00	0.00	1.86	0.71	0.53
989	0.17	-0.09	-0.10	0.01	0.02	0.02	1.47	1.21	1.66

Tabel 4. Overzicht bodemhelling, jaarlijkse bodemveranderingen en voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen per km-raai in de Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en Lek. \* NaN betekent geen meting.

	Bodemhelling [m/km]			Jrl bodemveranderingen [m/jaar]			Voortplantingssnelheden [km/jaar]		
	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000	1950-1970	1970-1990	1990-2000
880	-0.08	0.04	0.08	0.00	-0.01	0.02	1.88	3.05	4.48
881	-0.13	-0.26	-0.15	0.01	-0.02	0.03	0.97	2.71	6.20
882	-0.30	-0.30	-0.50	0.02	-0.04	0.00	1.33	2.79	2.31
883	-0.17	-0.07	0.02	0.01	-0.02	0.03	1.49	3.63	3.57
884	-0.11	-0.32	-0.33	0.01	-0.01	0.00	1.81	3.93	0.90
885	-0.19	0.04	-0.01	0.01	-0.03	-0.02	1.52	1.28	2.21
886	-0.10	0.18	0.22	0.01	0.03	0.03	1.60	0.95	1.65
887	-0.25	-0.17	-0.18	0.01	0.00	0.03	2.21	1.18	1.25
888	-0.02	-0.09	-0.09	0.01	0.01	0.01	0.92	1.01	1.18
889	-0.19	-0.22	-0.14	0.00	-0.01	0.04	1.52	0.94	1.67
890	-0.04	-0.26	-0.20	0.00	0.01	0.03	1.91	1.58	2.22
891	-0.17	-0.16	NaN	0.00	0.09	NaN	1.97	1.33	NaN
892	-0.22	NaN	NaN	0.00	NaN	NaN	1.69	NaN	NaN
893	0.06	NaN	NaN	0.01	NaN	NaN	1.46	NaN	NaN
894	-0.36	NaN	NaN	0.01	NaN	NaN	1.74	NaN	NaN
895	-0.21	NaN	NaN	0.01	0.05	0.01	1.22	NaN	NaN
896	-0.01	-0.03	-0.15	0.01	0.05	0.01	1.67	0.87	1.16
897	-0.31	-0.25	-0.26	0.01	0.00	-0.01	1.39	1.39	1.03
898	0.13	0.07	-0.08	0.01	0.00	0.00	0.95	1.82	0.86
899	0.03	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.88	0.86	1.09
900	-0.03	-0.19	-0.04	0.00	0.04	0.03	1.08	0.90	0.72
901	-0.18	-0.06	-0.03	0.01	0.04	0.02	1.22	0.80	1.68
902	-0.19	-0.18	NaN	0.00	-0.02	NaN	1.03	1.82	NaN
903	-0.16	-0.07	NaN	0.01	-0.01	0.00	1.02	1.00	NaN
904	-0.15	0.00	0.02	0.03	-0.02	0.02	1.02	1.58	2.26
905	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
906	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
907	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
908	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
909	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
910	NaN	NaN	NaN	0.03	-0.03	0.03	NaN	NaN	NaN
911	-0.29	-0.04	-0.08	0.02	-0.02	0.02	1.08	1.03	1.76
912	0.04	-0.04	-0.04	0.02	-0.03	0.04	1.27	2.12	0.82
913	-0.34	-0.33	-0.27	0.03	0.01	-0.01	0.82	1.42	1.17
914	-0.05	-0.07	-0.08	0.02	0.00	0.01	1.85	2.81	1.71
915	-0.21	-0.22	-0.14	0.01	-0.01	0.02	1.58	1.51	2.14

916	-0.10	-0.07	-0.13	0.01	-0.01	0.00	1.16	1.69	2.31
917	-0.17	-0.26	-0.25	0.02	-0.03	0.01	1.19	1.38	1.17
918	0.14	0.23	0.30	0.02	-0.02	0.01	1.55	1.97	1.03
919	-0.36	-0.43	-0.64	0.01	-0.02	0.03	1.01	0.87	1.35
920	0.28	0.32	0.41	0.01	-0.02	0.04	1.28	1.34	1.81
921	-0.12	-0.12	-0.05	0.00	0.01	0.04	1.63	1.85	2.04
922	-0.35	-0.51	-0.45	0.02	-0.02	0.07	1.27	0.70	2.03
923	0.00	0.14	-0.16	0.01	-0.01	-0.02	1.85	1.51	1.04
924	-0.22	-0.16	-0.08	0.01	-0.01	0.02	1.94	3.62	0.84
925	-0.13	-0.34	-0.36	0.01	-0.01	-0.02	1.53	2.72	1.66
926	-0.32	-0.30	-0.11	0.03	-0.02	0.02	1.22	2.32	2.55
927	0.08	0.26	-0.07	0.02	-0.01	-0.04	1.81	1.26	2.69
928	0.32	0.16	0.43	0.02	-0.02	0.01	1.28	1.47	1.67
929	-0.31	0.02	-0.07	0.01	0.01	0.01	1.18	1.69	2.41
930	-0.05	-0.30	-0.28	0.03	-0.03	-0.05	1.68	1.43	0.99
931	-0.14	-0.03	-0.03	0.04	-0.01	0.04	0.85	1.12	1.24
932	-0.05	-0.12	-0.24	0.01	-0.04	0.02	0.79	2.23	1.48
933	-0.22	0.03	0.00	0.03	-0.02	0.02	0.63	1.25	1.39
934	-0.15	-0.12	-0.03	0.02	-0.01	-0.02	0.92	1.44	1.15
935	0.05	0.18	0.17	0.03	-0.02	0.01	0.91	1.32	1.29
936	-0.04	-0.13	-0.32	0.02	0.02	0.00	0.48	2.36	1.17
937	-0.35	-0.52	-0.42	0.01	-0.03	-0.03	0.98	2.13	0.96
938	0.16	0.31	0.20	0.01	-0.01	-0.03	0.48	2.18	0.92
939	0.19	-0.02	0.12	0.00	0.01	-0.03	0.73	1.36	0.75
940	-0.23	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	1.00	1.16	1.96
941	-0.11	-0.21	-0.13	0.02	0.00	-0.06	1.67	1.20	0.78
942	-0.11	-0.21	-0.22	0.00	0.02	-0.02	1.22	1.13	1.22
943	-0.17	-0.20	-0.13	0.01	-0.02	0.00	2.43	1.62	0.86
944	0.09	-0.08	-0.06	0.01	-0.04	-0.03	1.20	2.02	1.46
945	-0.50	-0.29	-0.19	0.02	0.00	0.05	1.22	0.59	0.81
946	0.22	0.15	0.12	0.03	0.01	0.11	0.74	0.69	0.95
947	-0.16	-0.23	-0.31	0.02	-0.03	0.04	0.55	1.15	0.71
948	-0.17	-0.15	-0.17	0.03	-0.05	-0.01	0.65	0.84	1.52
949	-0.02	0.00	-0.04	0.02	-0.06	0.02	1.20	1.41	1.11
950	-0.03	0.22	0.14	0.01	-0.05	0.02	1.30	1.12	0.52
951	0.04	-0.19	-0.10	0.01	-0.01	0.06	1.35	1.35	1.17
952	0.10	-0.01	-0.10	0.02	-0.02	0.02	1.09	1.08	0.45
953	-0.03	-0.04	0.06	0.01	-0.01	0.01	1.34	0.93	0.53
954	-0.15	-0.14	-0.22	0.02	-0.02	0.01	1.44	1.26	0.70

955	-0.29	-0.22	-0.21	0.01	-0.01	-0.02	1.71	0.60	0.99
956	0.07	0.01	0.04	0.01	0.01	-0.01	2.11	1.26	0.79
957	-0.02	-0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	1.01	1.13	1.24
958	-0.07	-0.02	-0.13	0.03	0.00	-0.01	0.79	0.90	1.43
959	-0.06	-0.10	-0.03	0.03	-0.03	0.02	1.15	1.31	0.71
960	-0.19	0.01	-0.21	0.03	0.00	-0.04	1.02	1.52	1.06
961	0.08	-0.02	-0.03	0.02	0.01	0.01	1.77	1.38	0.86
962	-0.12	-0.17	-0.08	0.04	-0.02	0.01	0.73	1.59	0.66
963	-0.10	0.01	-0.03	0.03	-0.02	-0.02	1.44	1.31	0.78
964	-0.14	-0.16	-0.08	0.04	-0.02	0.00	1.21	1.25	1.90
965	0.00	0.05	-0.10	-0.01	-0.01	-0.01	0.66	1.45	0.93
966	-0.06	0.08	0.25	0.03	0.00	0.00	0.47	1.71	0.90
967	-0.13	-0.15	-0.14	0.03	-0.01	0.02	0.67	1.35	1.14
968	0.00	-0.05	0.04	0.03	-0.01	0.01	2.13	2.15	1.62
969	-0.02	0.01	0.05	0.02	-0.02	-0.01	1.24	2.29	1.76
970	0.05	-0.02	0.04	0.02	-0.02	0.03	1.39	2.59	0.56
971	-0.32	-0.22	-0.20	0.03	0.00	-0.03	0.80	0.82	1.13
972	-0.06	0.10	-0.03	0.05	-0.04	-0.01	0.59	0.96	1.26
973	-0.14	-0.23	-0.08	0.04	-0.02	-0.04	1.00	0.90	0.91
974	-0.03	0.11	0.01	0.03	0.01	0.03	0.98	0.88	0.54
975	0.26	0.11	0.17	0.01	0.00	0.02	1.02	0.97	2.17
976	-0.09	-0.07	-0.10	0.01	-0.01	0.00	0.67	1.12	0.47
977	0.03	0.07	0.06	0.02	0.00	0.00	0.65	1.21	0.94
978	0.01	-0.01	-0.09	0.03	0.00	-0.01	1.29	0.82	0.99
979	-0.16	-0.06	-0.01	0.00	0.02	0.02	0.73	1.08	1.41
980	0.14	-0.02	-0.04	0.01	0.01	-0.01	0.91	1.73	0.78
981	-0.02	0.07	0.20	-0.02	0.01	0.01	1.43	0.74	0.62
982	-0.23	-0.20	-0.22	0.00	0.00	0.01	0.64	1.45	1.07
983	0.13	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.39	2.03	0.99
984	-0.17	-0.26	-0.16	-0.03	0.02	-0.01	0.47	1.23	1.30
985	-0.25	-0.19	-0.13	-0.03	0.05	0.01	0.53	0.80	1.04
986	0.18	0.22	0.11	-0.01	0.01	0.00	0.23	0.67	0.73
987	-0.02	-0.05	0.01	-0.01	0.00	0.03	1.36	1.72	0.91
988	-0.27	-0.15	-0.09	-0.02	0.02	-0.01	2.62	0.79	0.45
989	0.22	0.13	-0.18	0.00	0.00	0.01	0.60	1.39	0.41
990	-0.14	-0.14	-0.08	0.02	0.00	-0.01	0.53	1.68	2.40
991	-0.21	-0.22	-0.30	0.00	0.01	0.00	0.95	0.69	0.38
992	-0.43	-0.34	-0.02	-0.04	0.02	0.07	1.03	0.99	0.52
993	0.35	0.21	-0.19	0.01	0.00	0.00	0.31	0.67	0.30

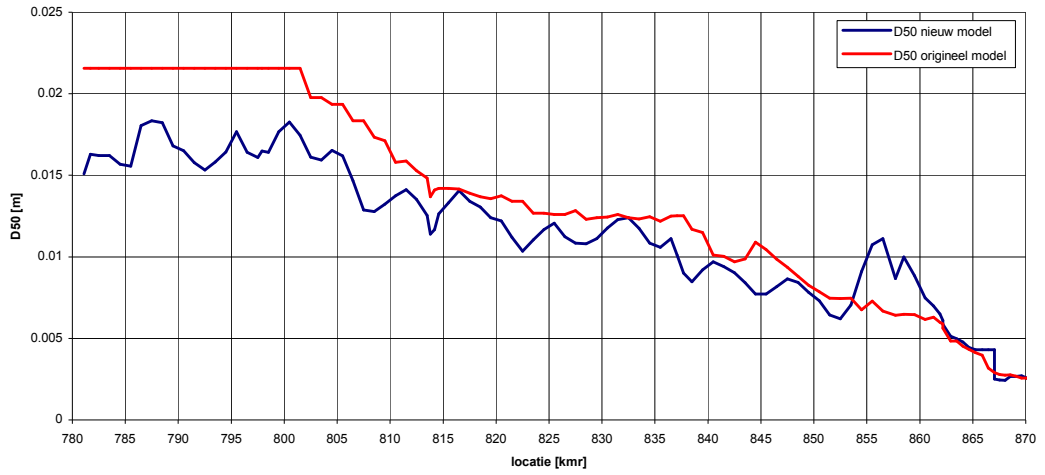
994	-0.13	0.00	0.02	0.01	0.00	-0.02	1.87	1.07	1.23
995	0.09	-0.11	-0.30	0.02	-0.02	-0.02	0.63	1.50	0.68
996	0.11	0.40	0.51	0.04	-0.01	-0.01	0.80	2.13	0.25
997	0.19	-0.01	0.21	0.03	0.00	-0.02	1.44	0.93	1.09
998	-0.38	-0.30	-0.50	0.03	-0.01	-0.03	1.77	1.43	1.13
999	0.09	0.12	0.23	0.02	-0.01	-0.02	1.17	3.21	1.88
1000	0.09	0.03	-0.04	0.02	-0.01	-0.04	1.38	2.35	1.69

Tabel 5. Overzicht bodemhelling, jaarlijkse bodemveranderingen en voortplantingssnelheid van lokale bodemverstoringen per km-raai in de IJssel.

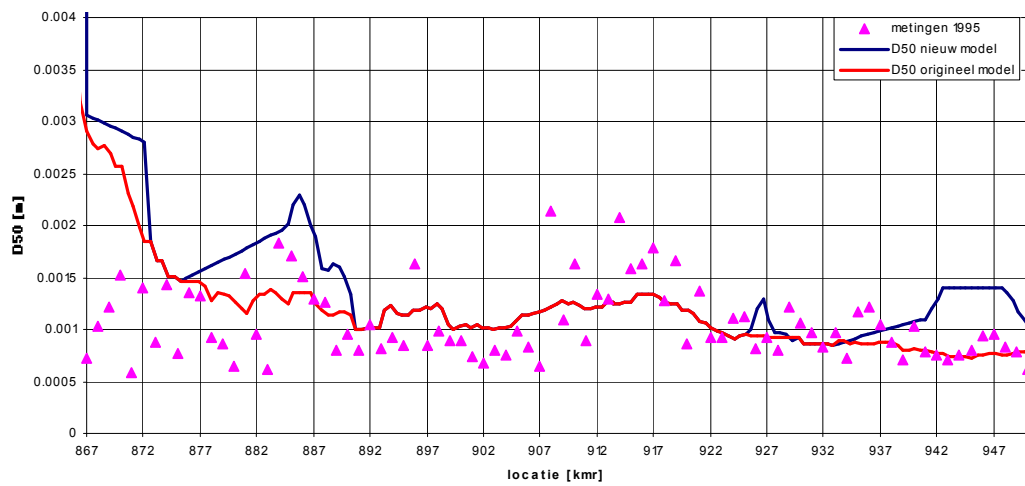


## B Ruimtelijk verloop korreldiameter $D_{50}$

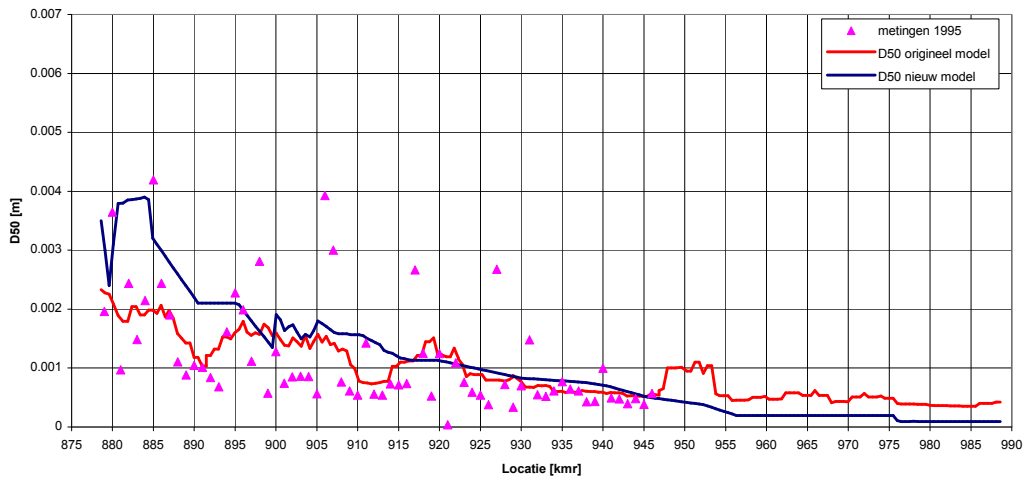
D50 Bovenrijn



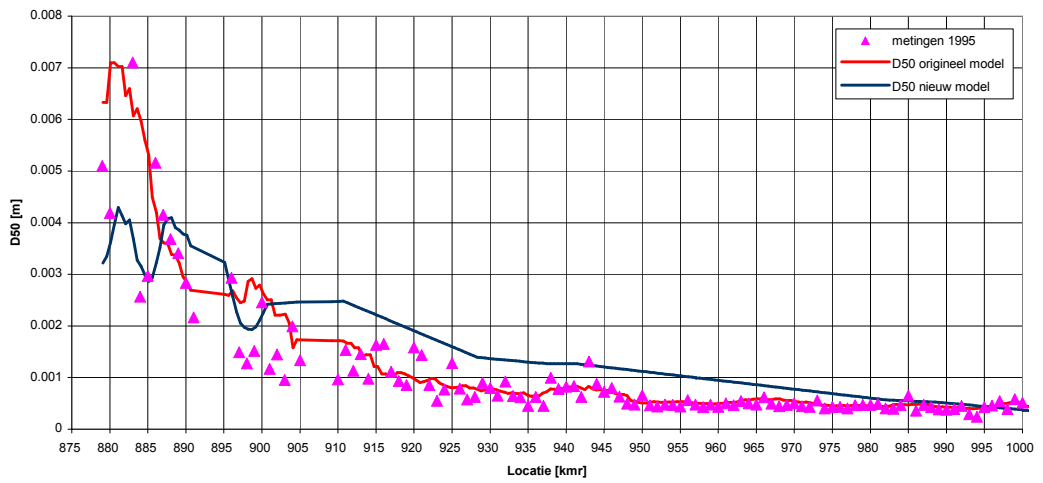
D50 Waal



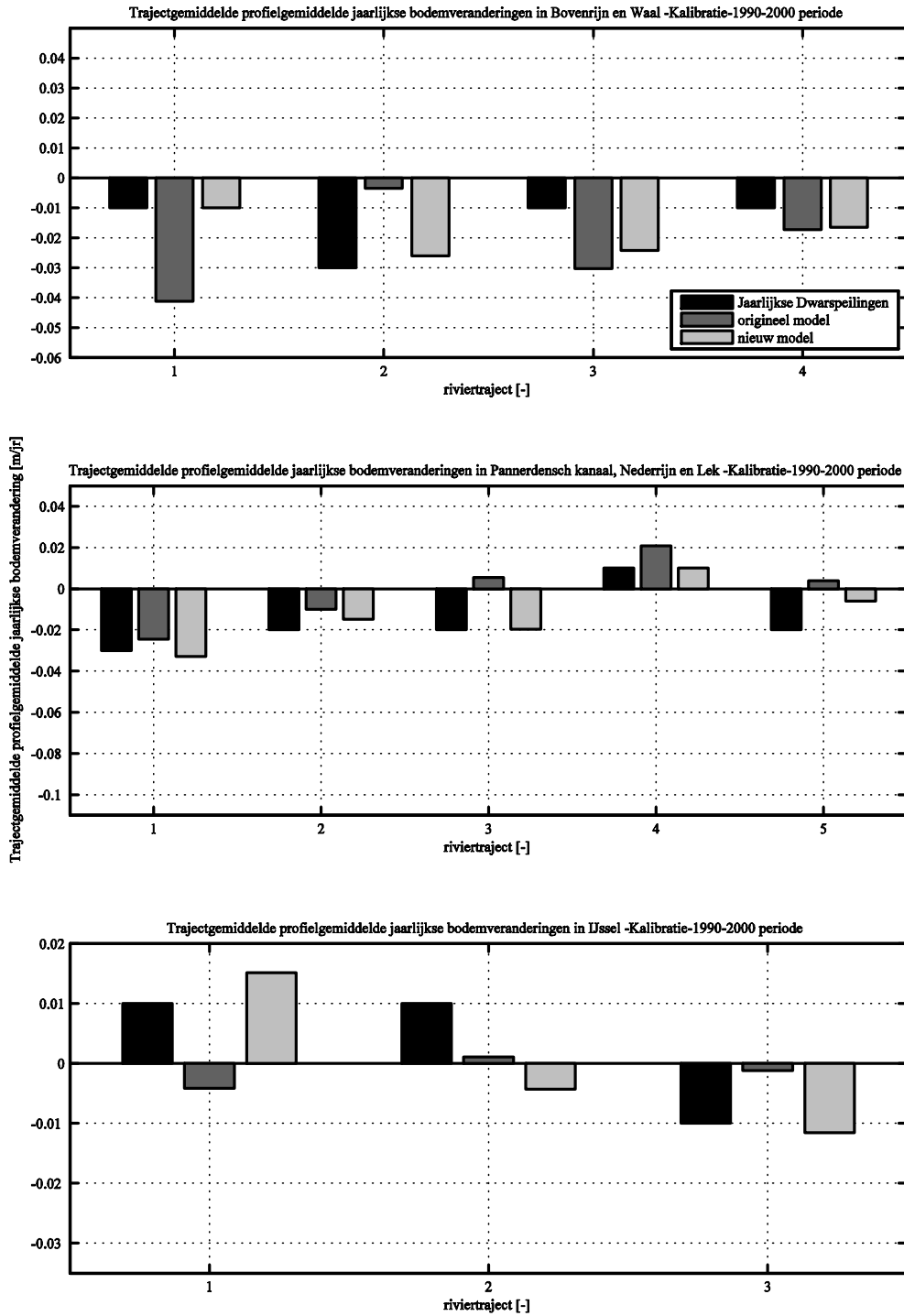
D50 Nederrijn en Lek



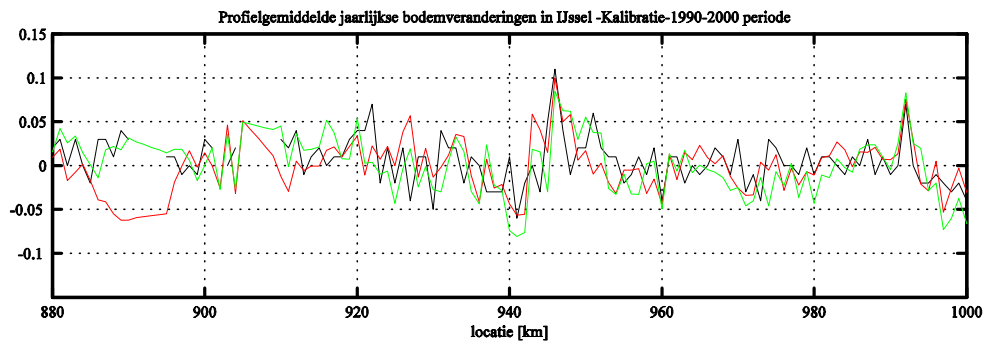
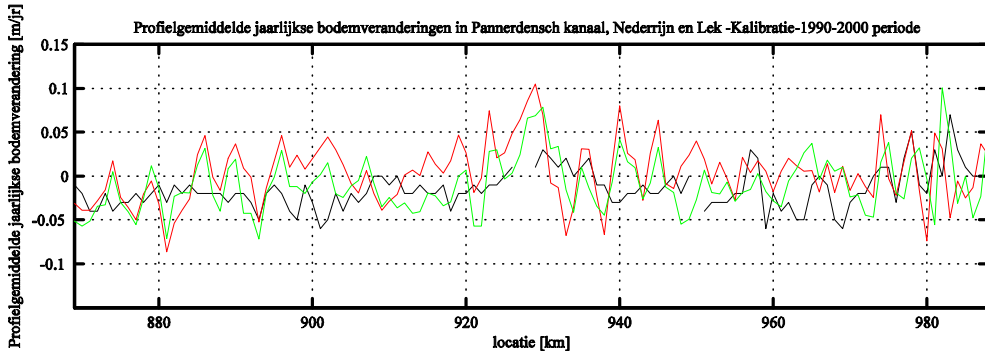
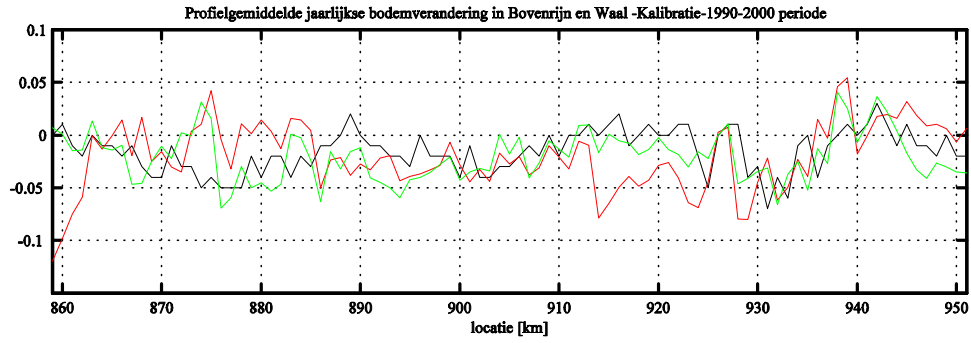
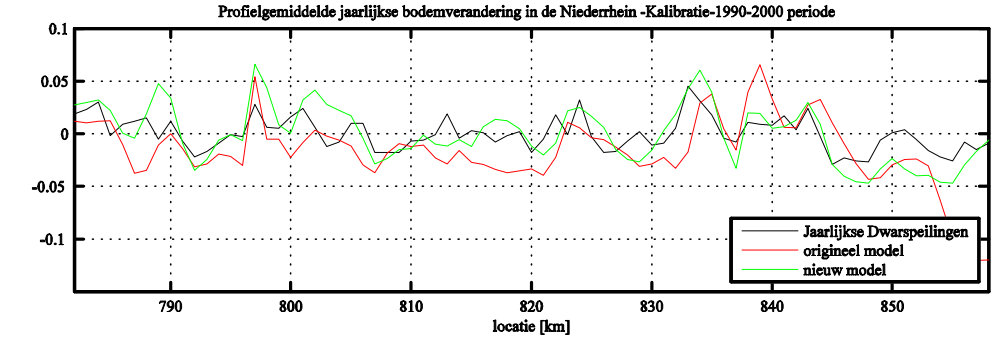
D50 IJssel



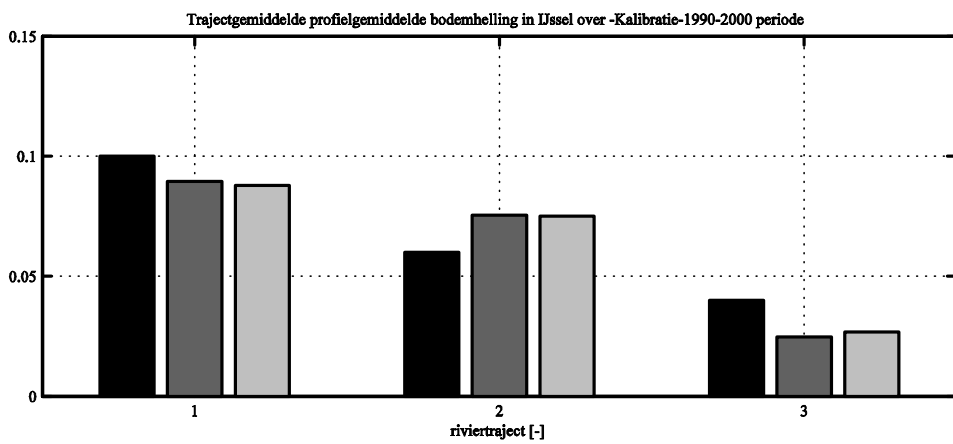
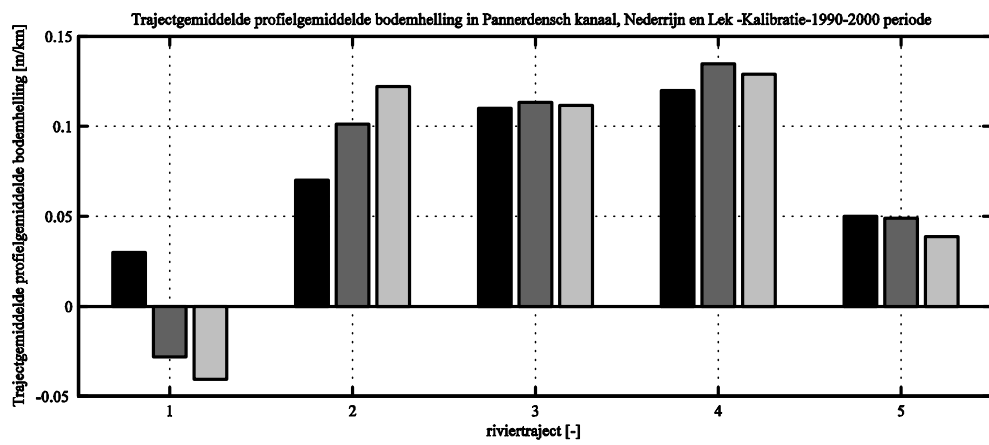
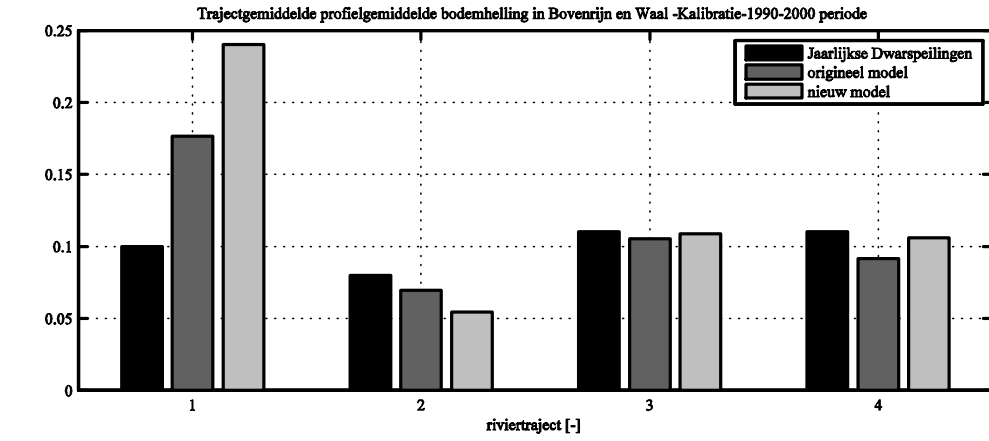
## C Resultaten modelkalibratie – morfologische parameters



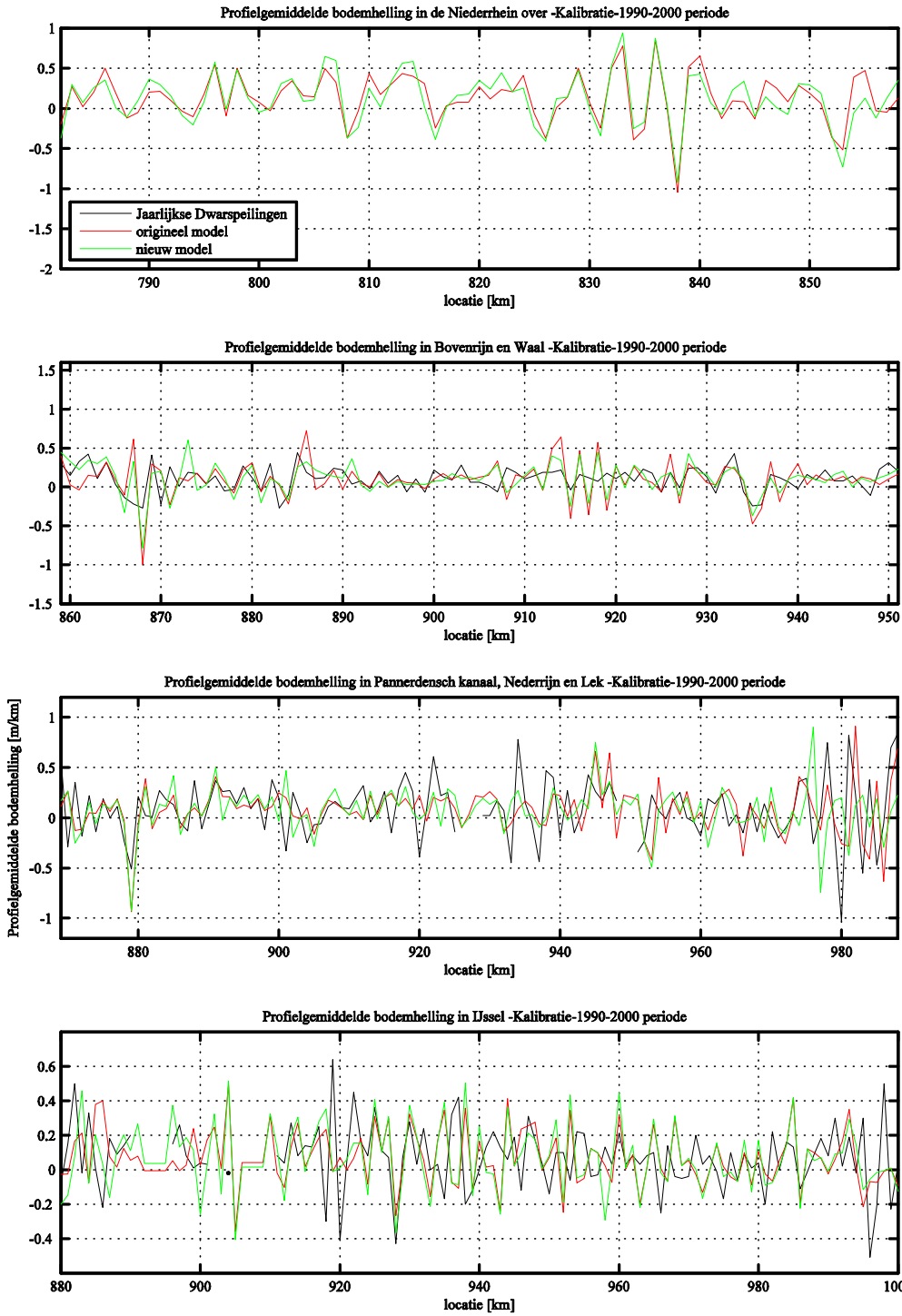
Kalibratie-1990-2000 (17:11:13 on Fri 24th Feb 2005)



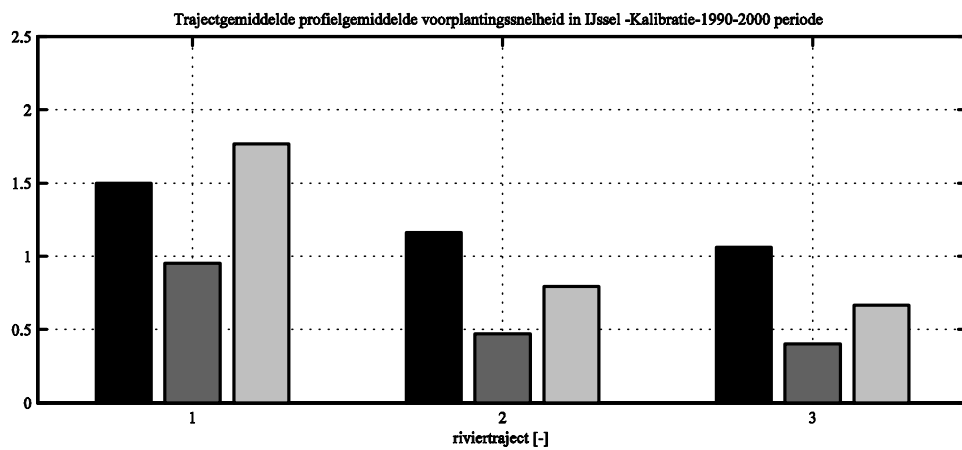
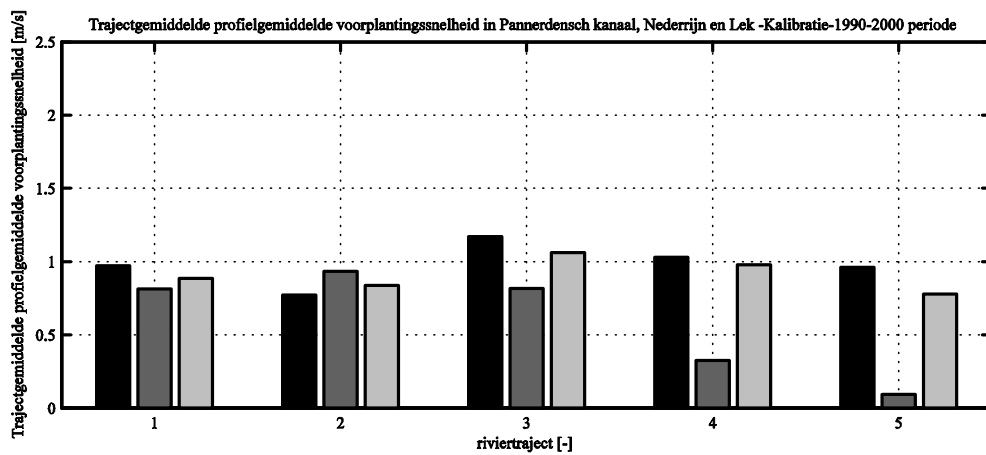
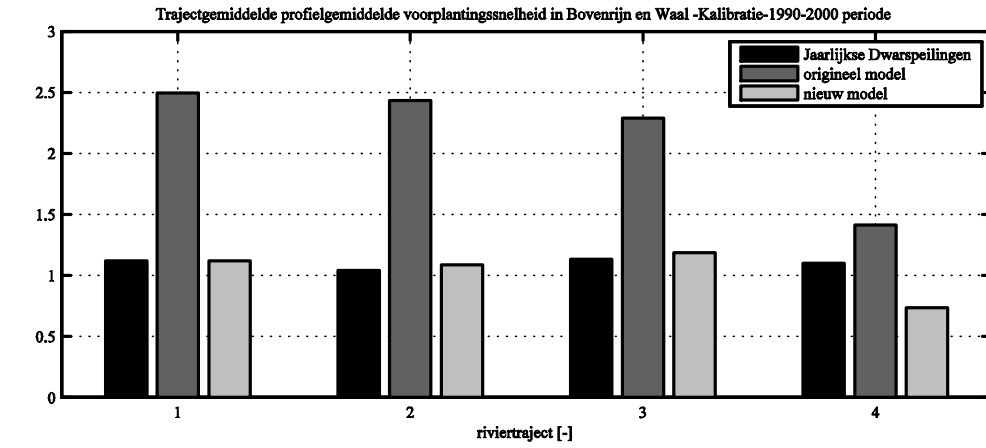
Kalibratie-1990-2000 (18:11:01 on Fri 24th Feb 2006)



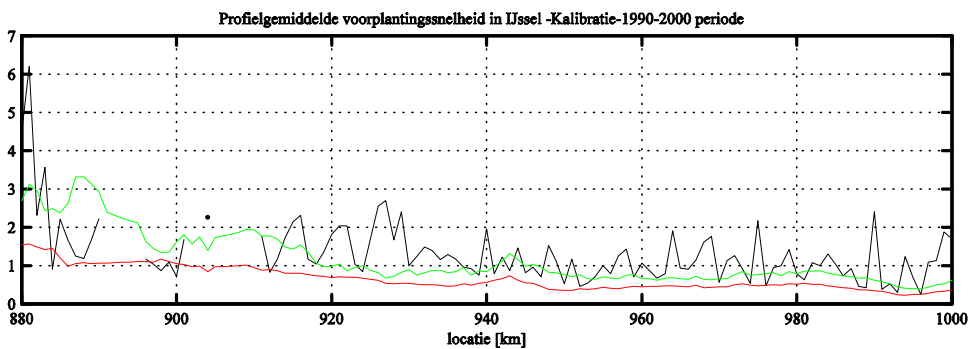
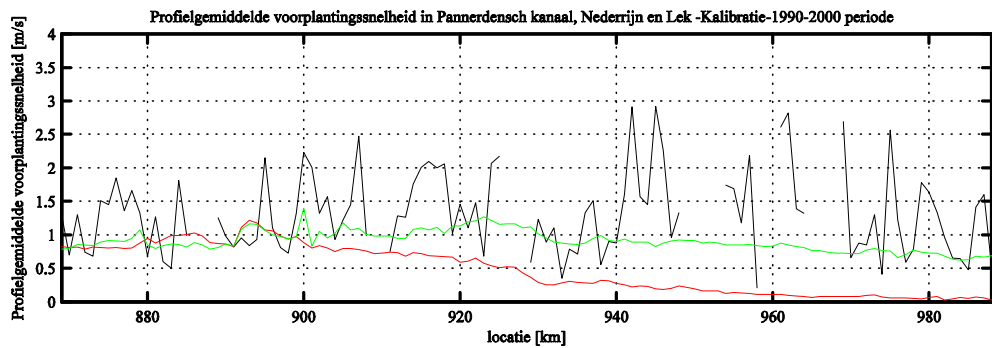
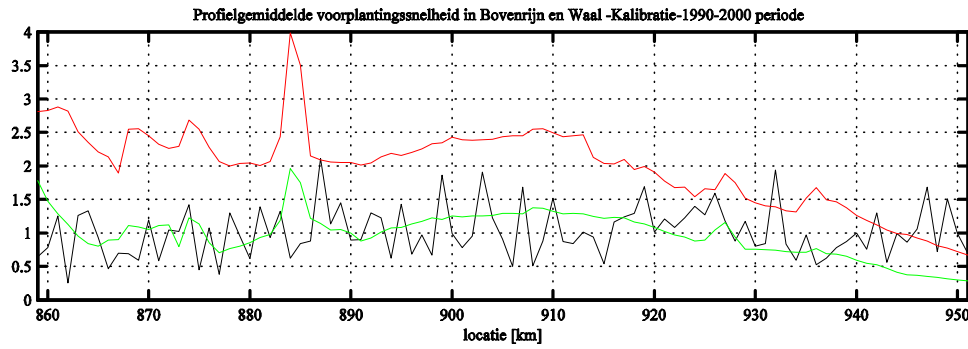
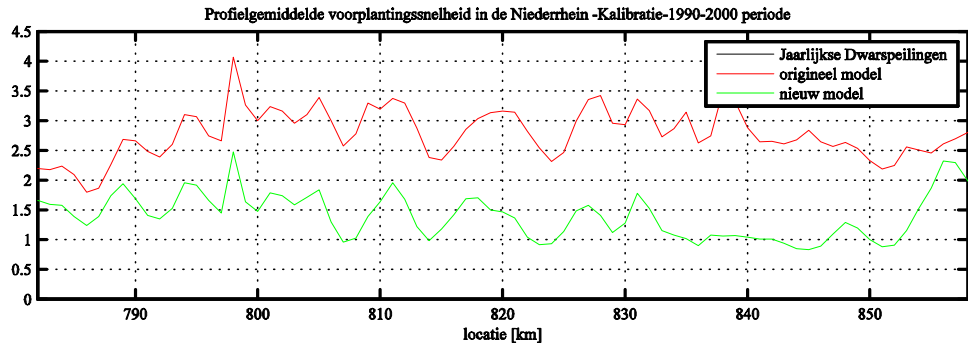
Kalibratie-1990-2000 (17:11:11 on Fri 24th Feb 2006)



Kalibratie-1990-2000 (17:11:14 on Fri 24th Feb 2006)

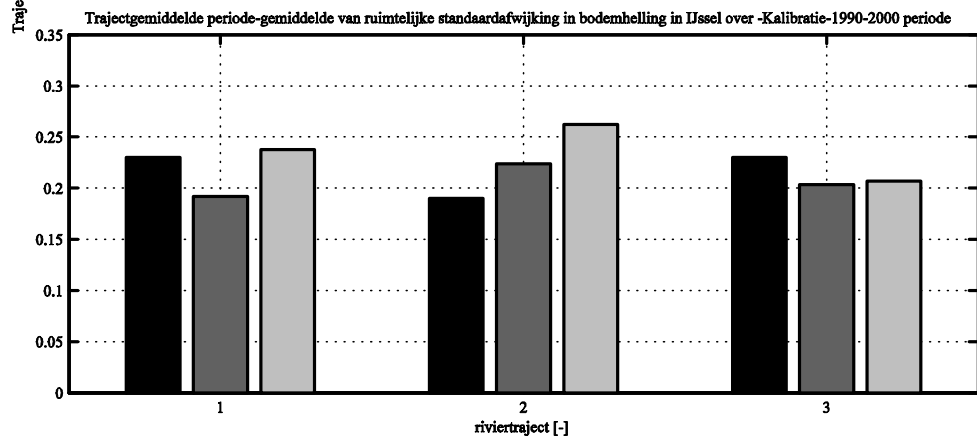
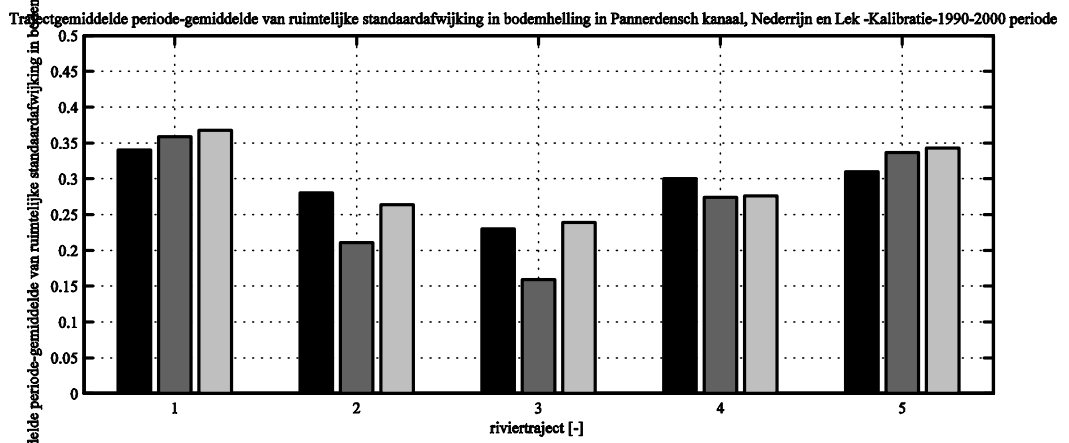
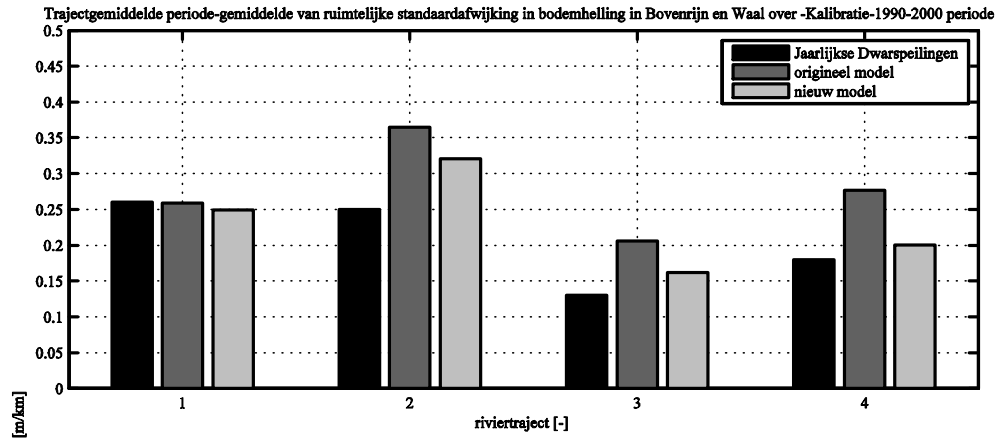


Kalibratie-1990-2000 (17:11:13 on Fri 24th Feb 2006)



Kalibratie-1990-2000 (17:11:15 on Fri 24th Feb 2006)



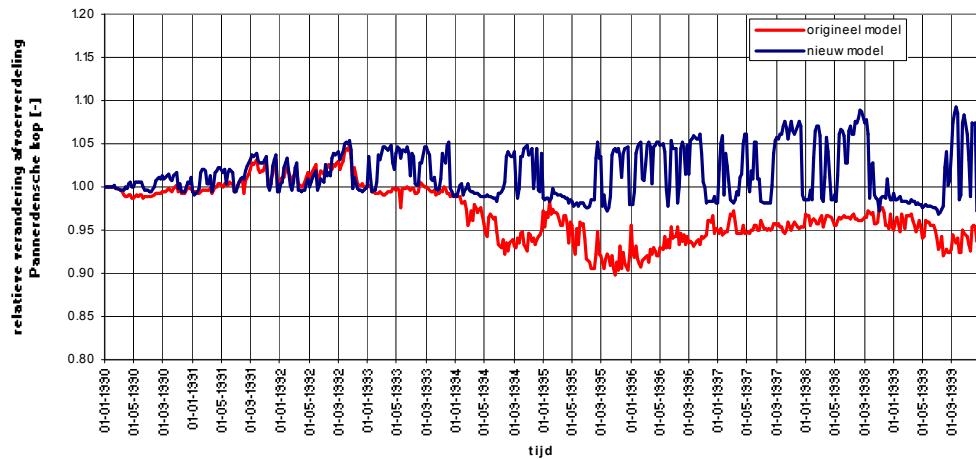


Kalibratie-1990-2000 (17:11:12 on Fri 24th Feb 2006)

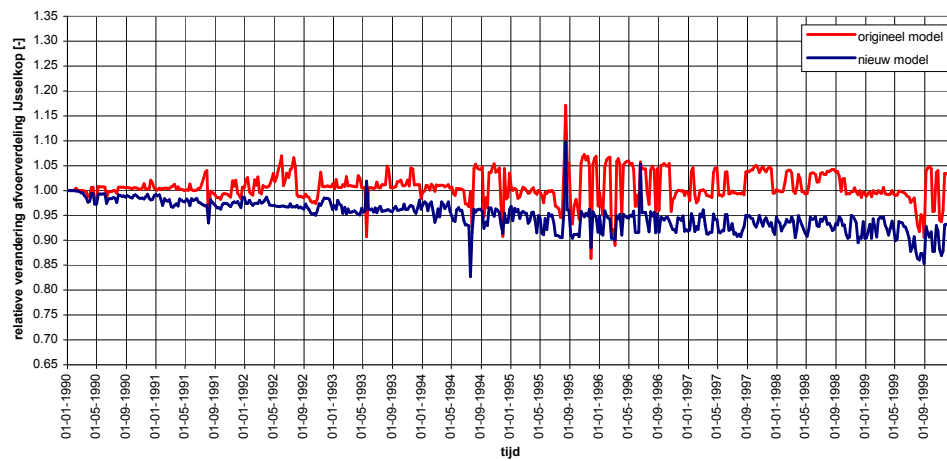
## D Resultaten modelkalibratie – Stabiliteit splitsingspunt

Afvoerverdeling op de splitsingspunten

Verandering afvoerverdeling Q Waal/Q Panndensch Kanaal  
t.o.v. afvoerverdeling in hydraulische som



Verandering afvoerverdeling Q IJssel/Q Nederrijn t.o.v. afvoerverdeling in hydraulische som

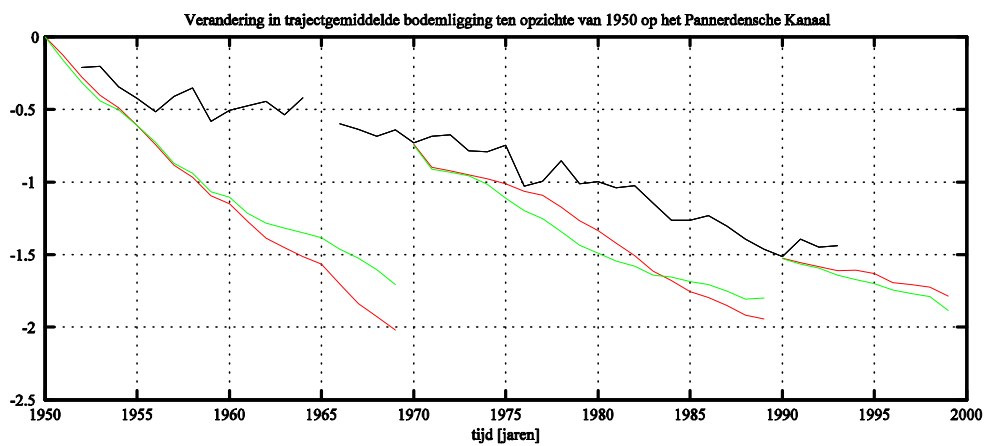
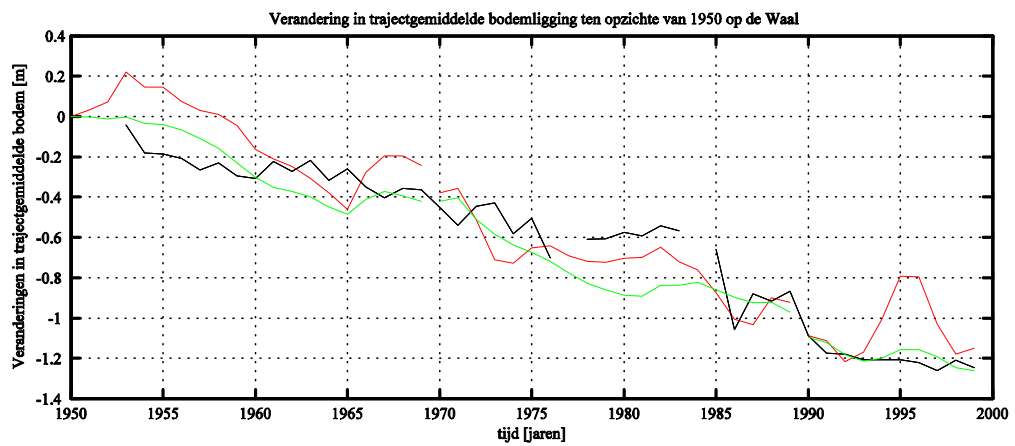
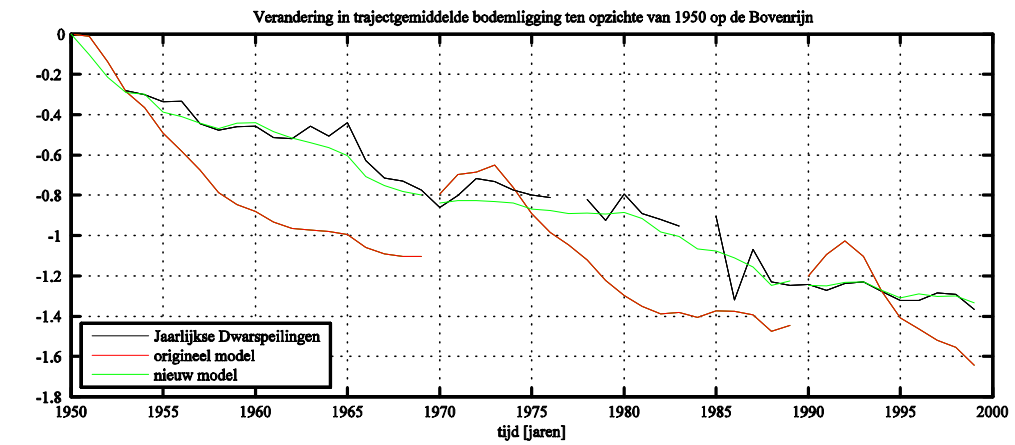


## Sedimentverdeling op de splitsingspunten

	Origineel model		Nieuw model		Sedimentbalans (Ten Brinke, 2001)	
Pannerdensch Kop	Bovenrijn - uit 955.000		Bovenrijn - uit 342.000		Bovenrijn - uit 577.000	
	Waal - in 830.000 87%	PK - in 125.000 13%	Waal - in 280.000 82%	PK - in 62.000 18%	Waal - in 507.000 88%	PK - in 70.000 12%
	PK - uit 176.000		PK - uit 179.000		PK - uit 97.000	
IJsselkop	IJssel - in 95.000 54%	Nederrijn - in 81.000 46%	IJssel - in 64.000 36%	Nederrijn - in 115.000 64%	IJssel - in 37.000 38%	Nederrijn- in 60.000 62%

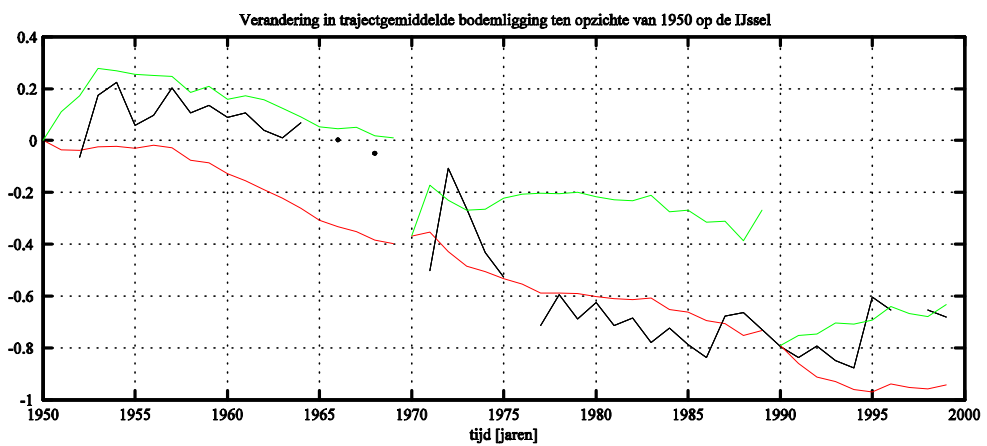
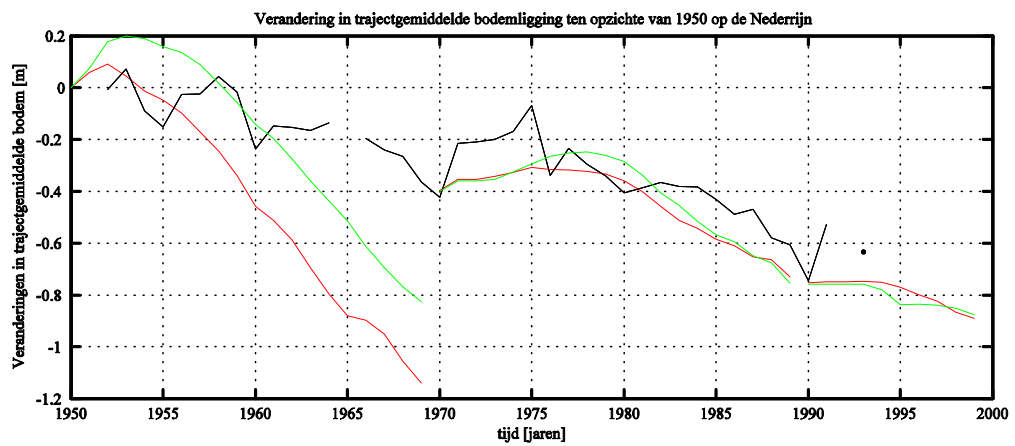
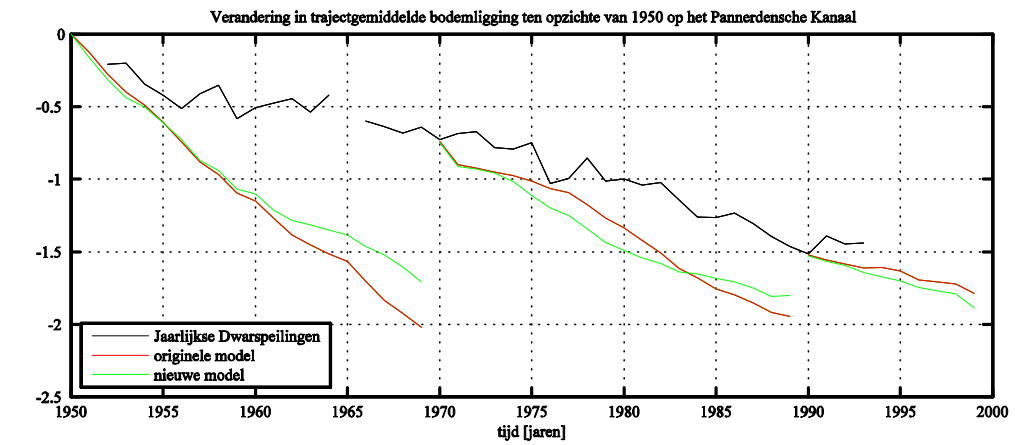
Tabel 1. Sedimentverdeling op basis van jaartransporten op de Pannerdensch Kop en IJsselkop.

### Verloop 10-km gemiddelde bodemligging rond de Pannerdensche Kop in de tijd



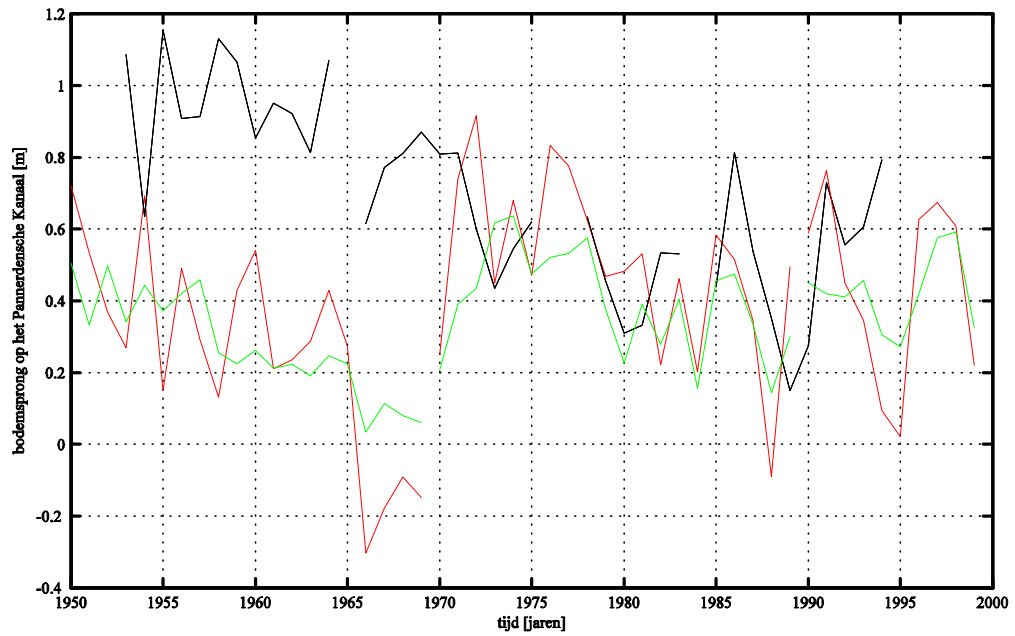
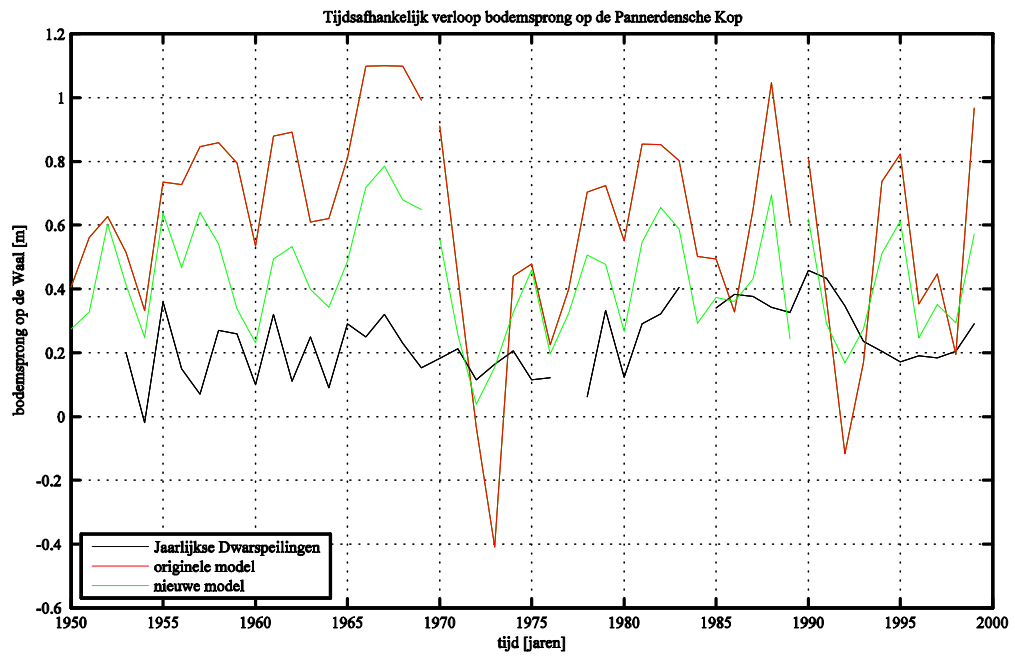
WL | Delft Hydraulics (16:43:50 on Tue 28th Feb 2006)

### Verloop 10-km gemiddelde bodemligging rond de IJsselkop in de tijd



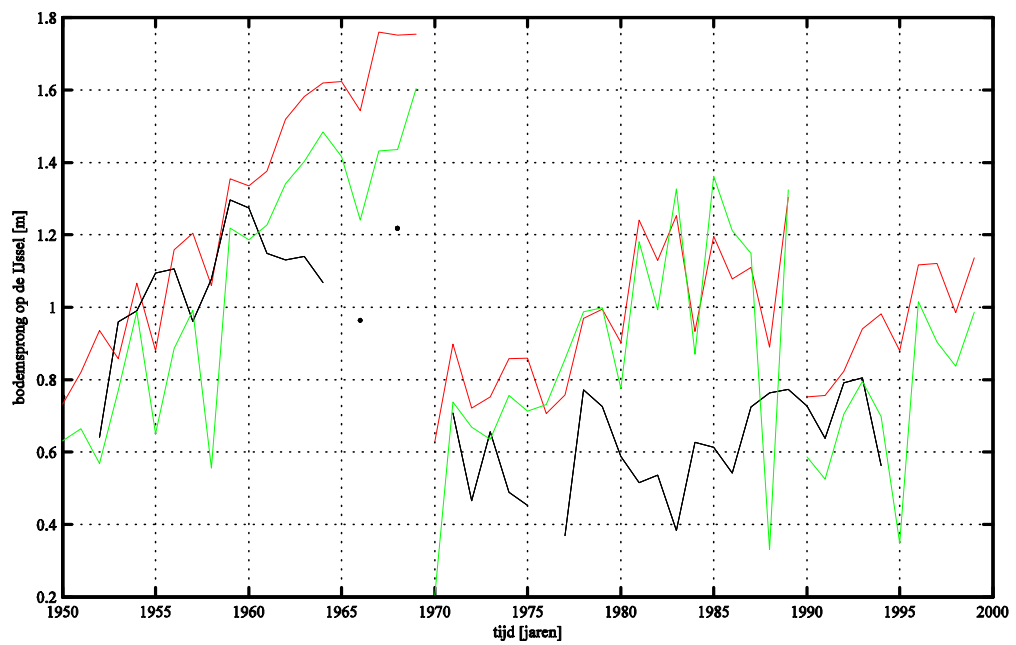
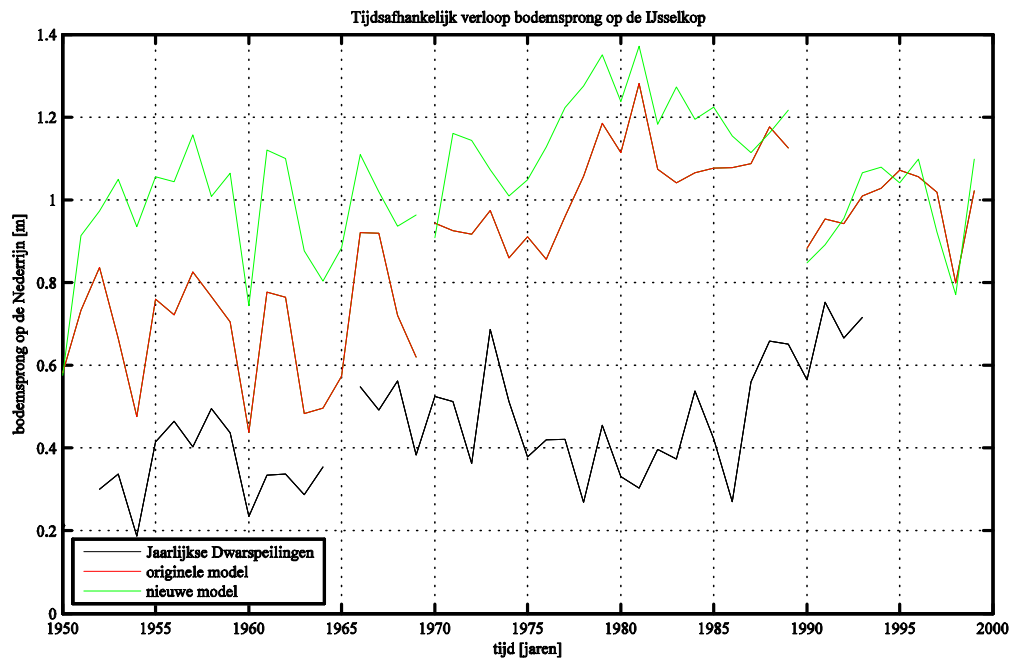
WL | Delft Hydraulics (16:54:44 on Tue 28th Feb 2006)

### Verloop bodemsprongen op de Pannerdenschse Kop in de tijd



WL | Delft Hydraulics (16:43:53 on Tue 28th Feb 2006)

### Verloop bodemsprongen op de IJsselkop in de tijd

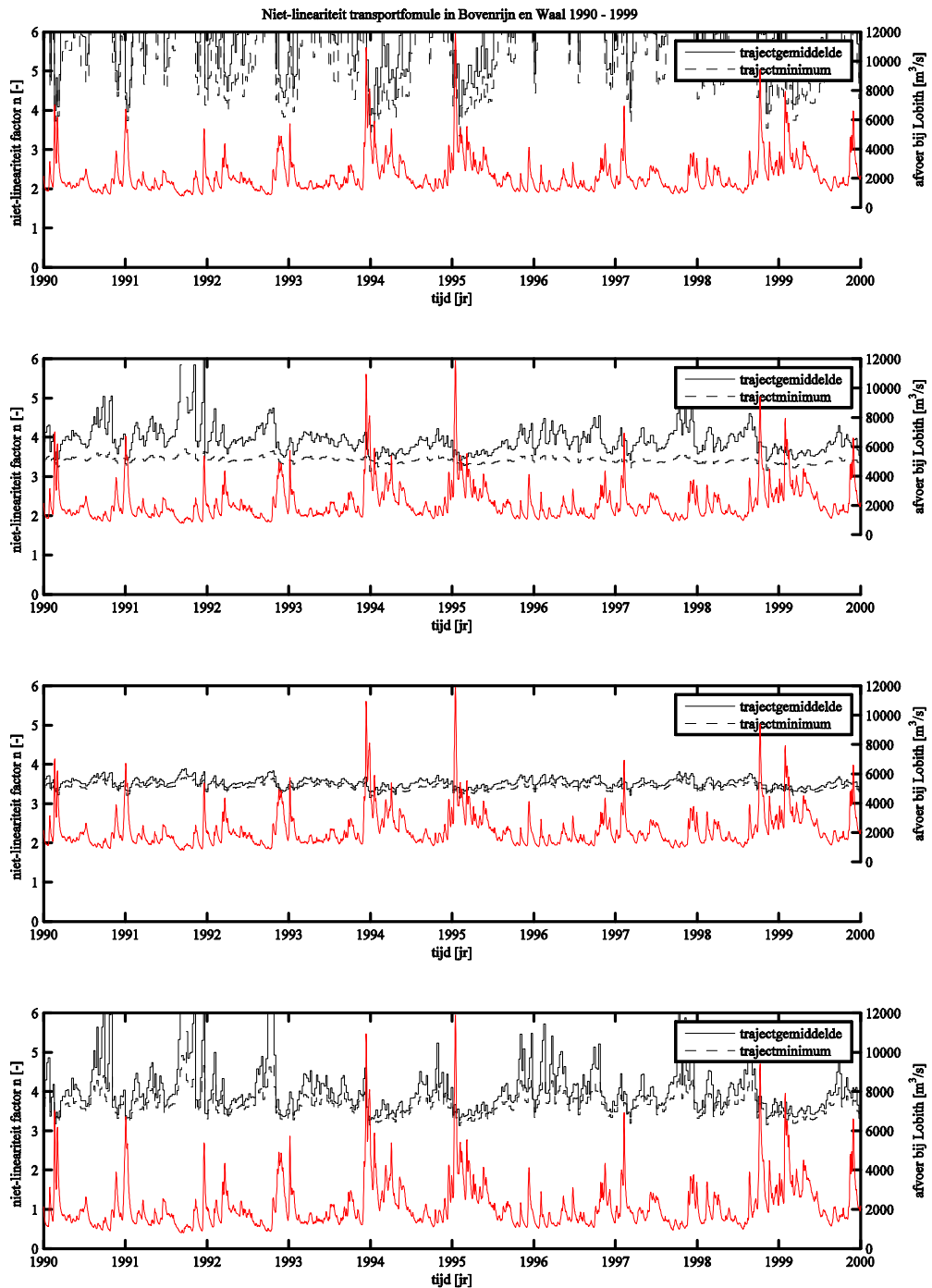


WL | Delft Hydraulica (16:43:54 on Tue 28th Feb 2006)

# E Resultaten modelkalibratie – Niet-lineariteitparameter n

Niet-lineariteitparameter n in transportformule

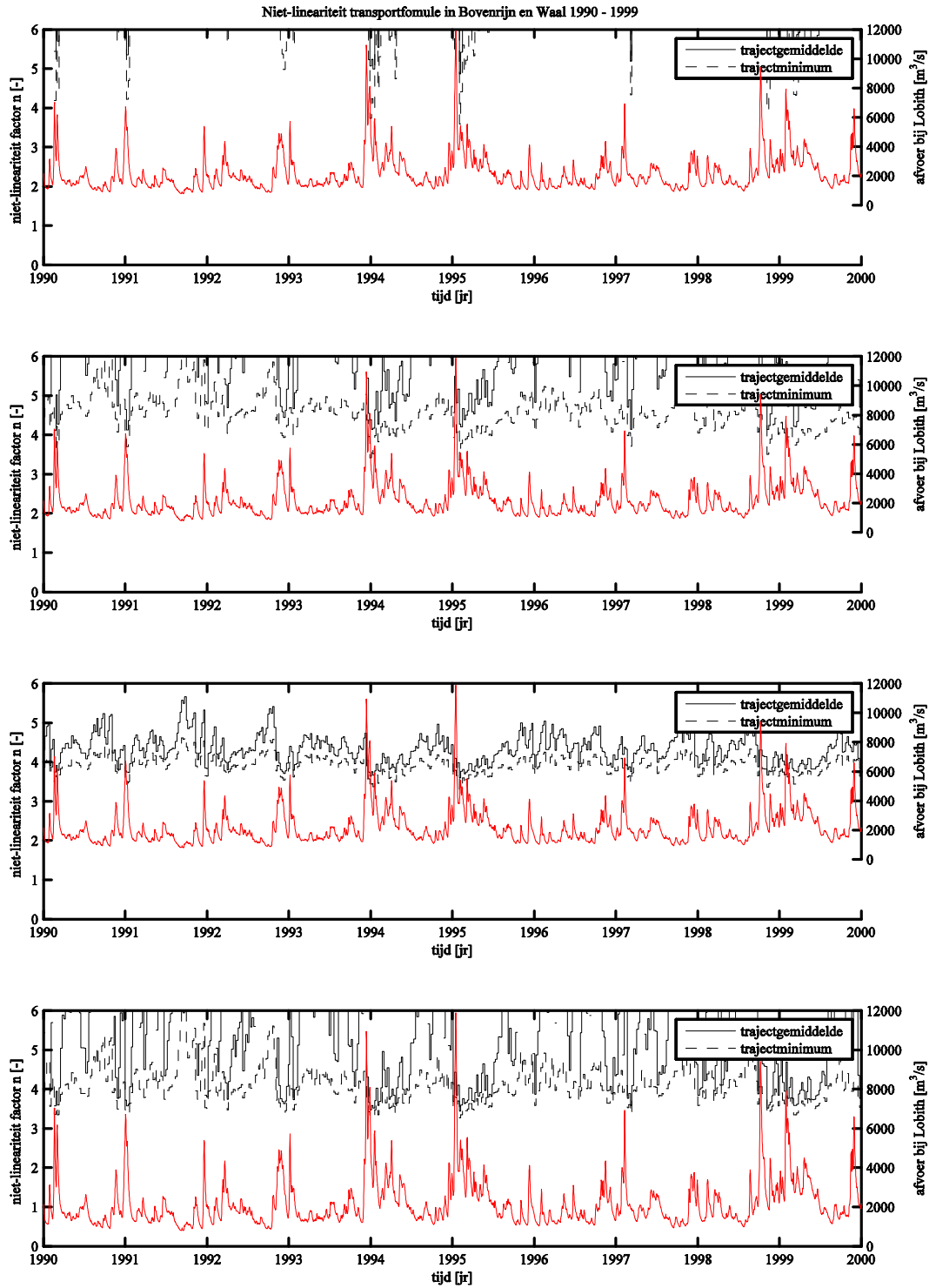
De rode lijn in onderstaande figuur geeft de afvoertijdreeks op de bovenrand weer.



R00 (16:58:24 on Fri 24th Feb 2006)

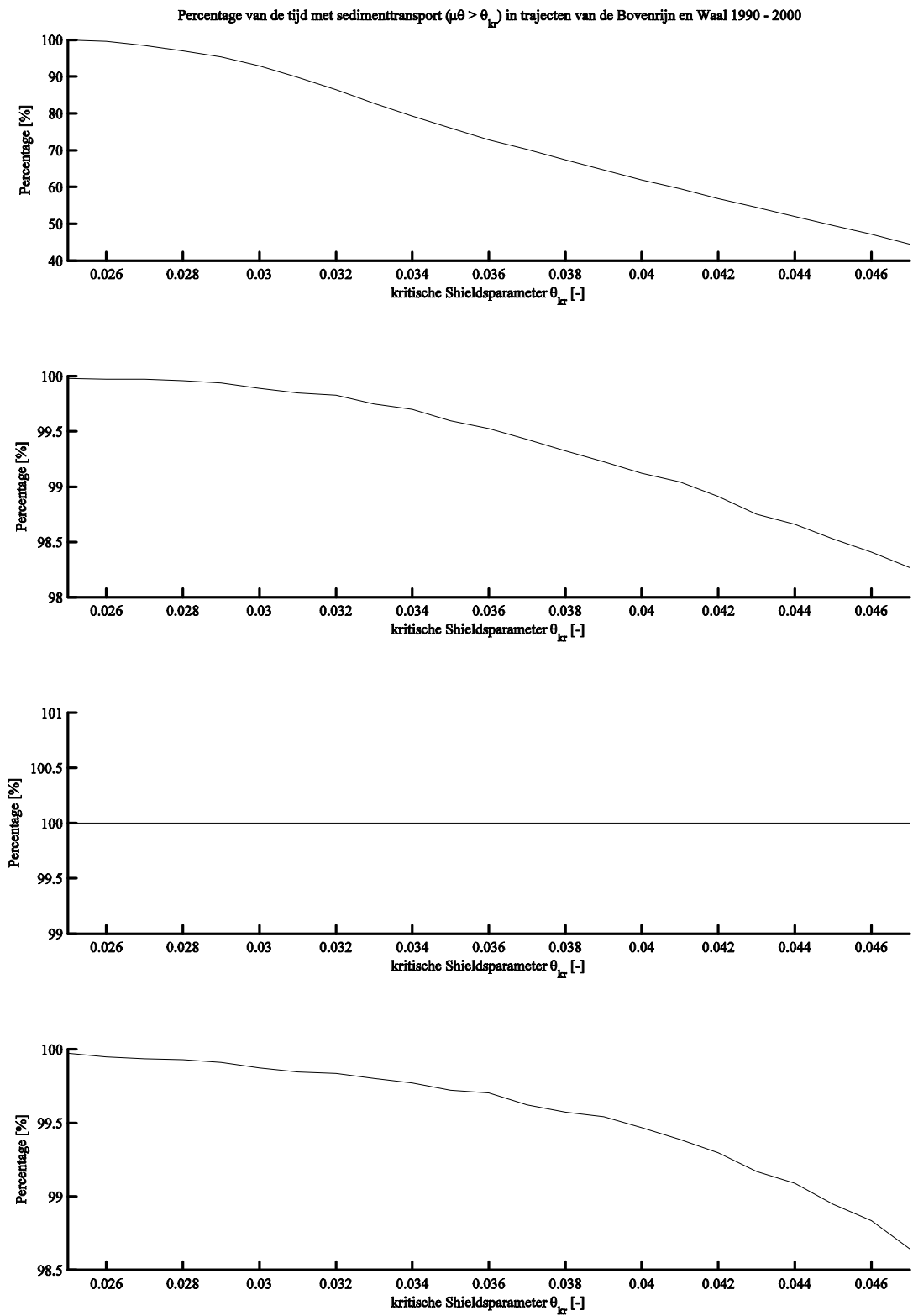


De rode lijn in onderstaande figuren geeft de afvoertijdreeks op de bovenrand weer.

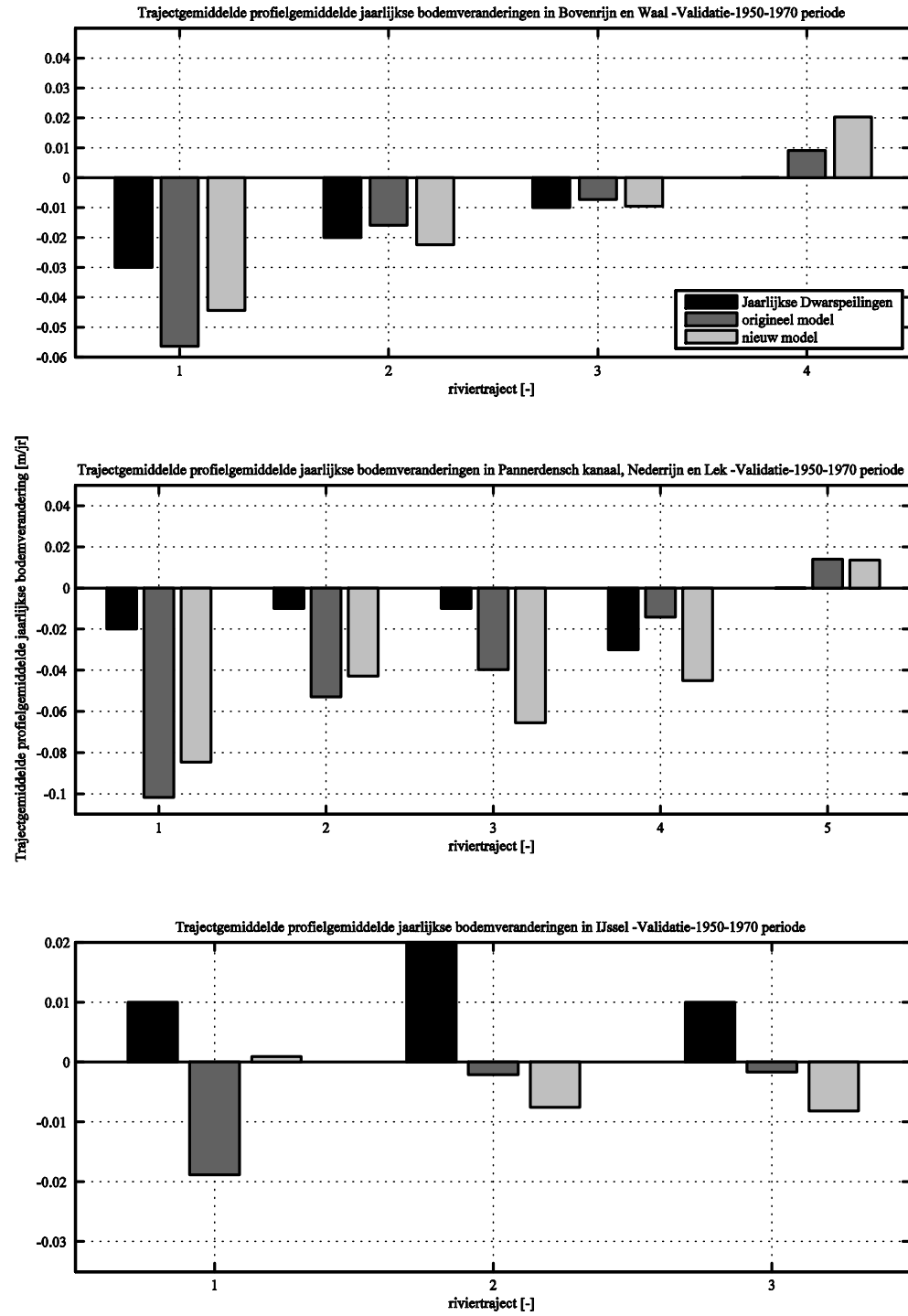


K02 (18:57:50 on Fri 24th Feb 2006)

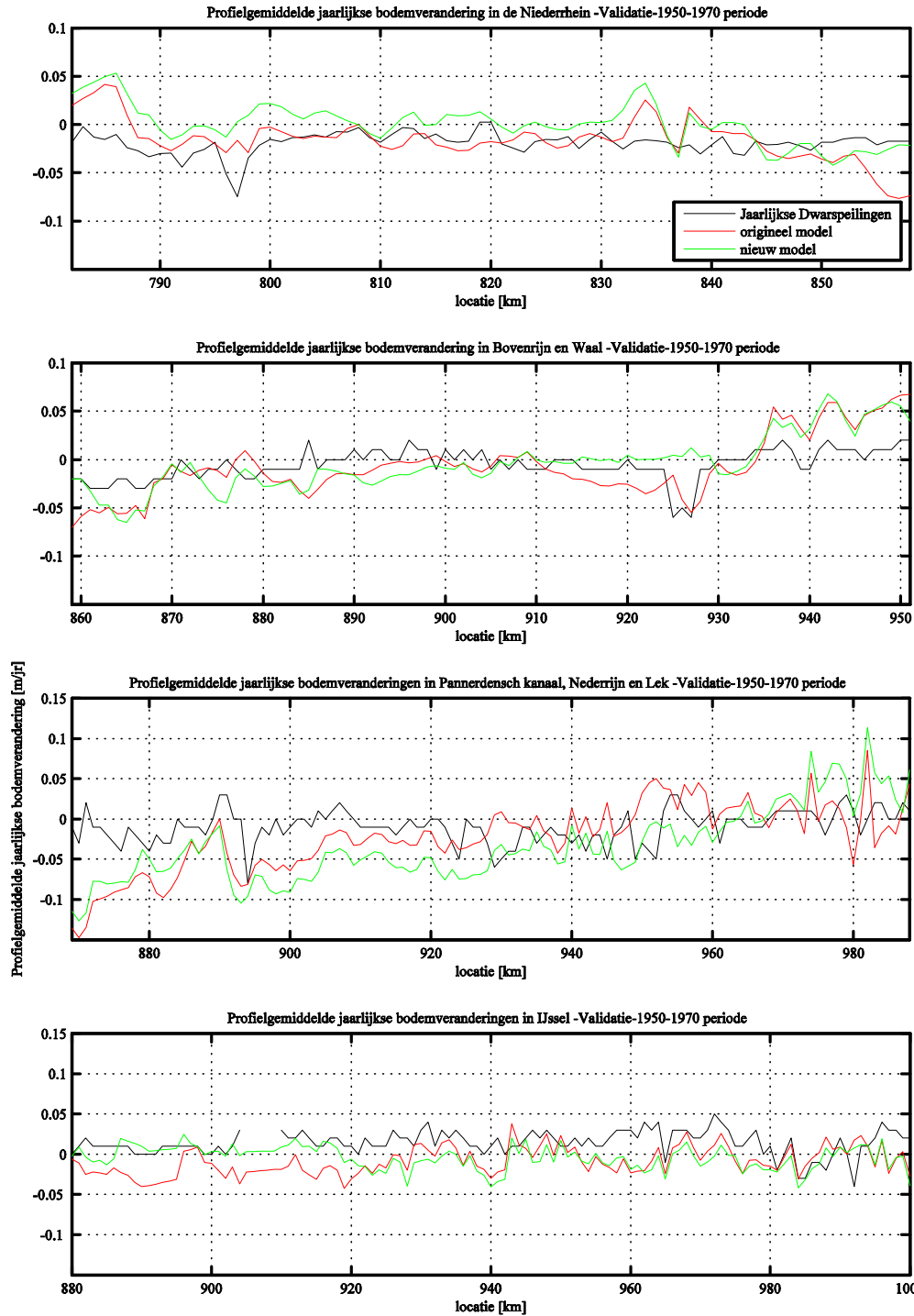
## Percentage sedimenttransport als functie van tijd



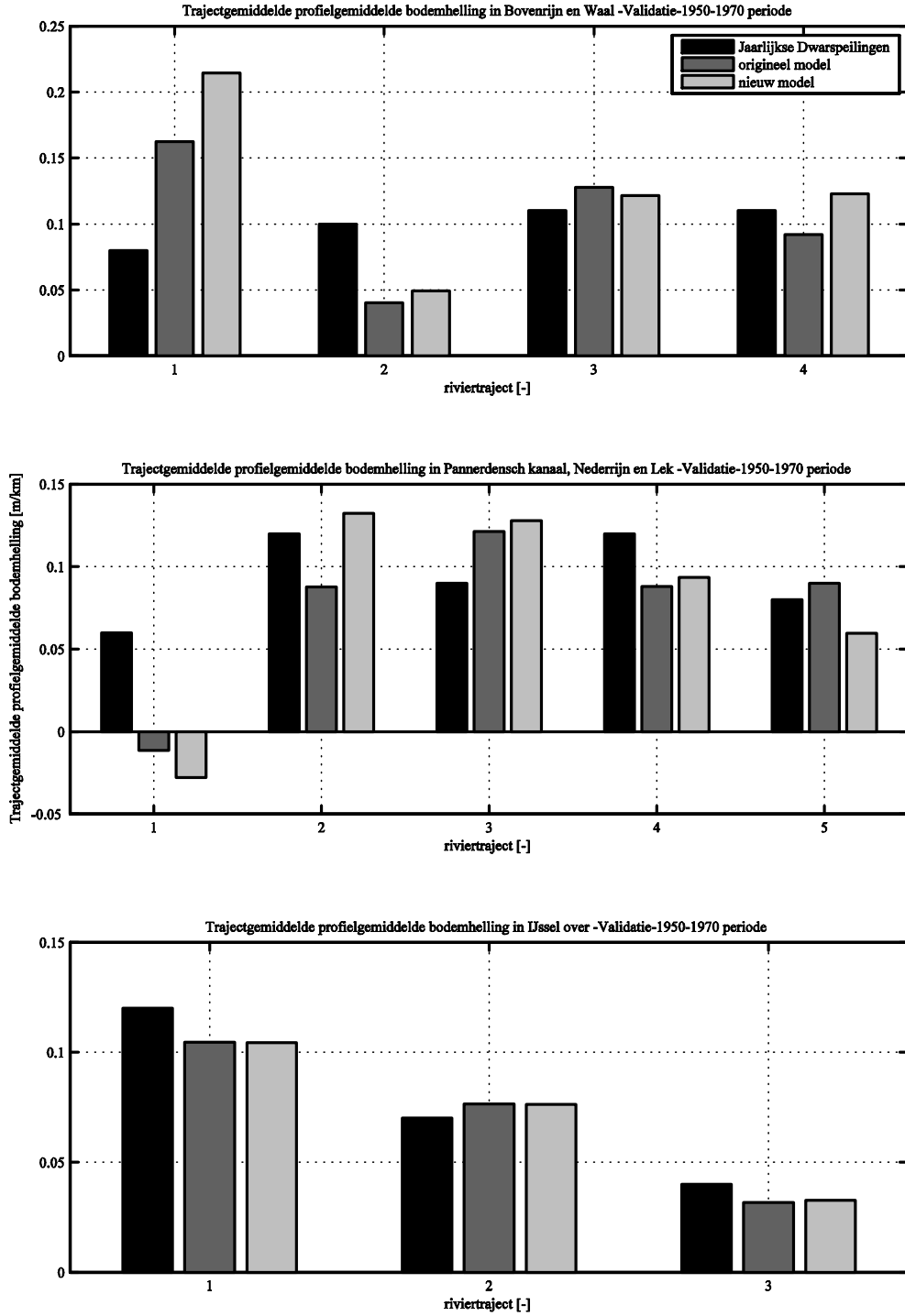
## F Resultaten modelverificatie – periode 1950-1970



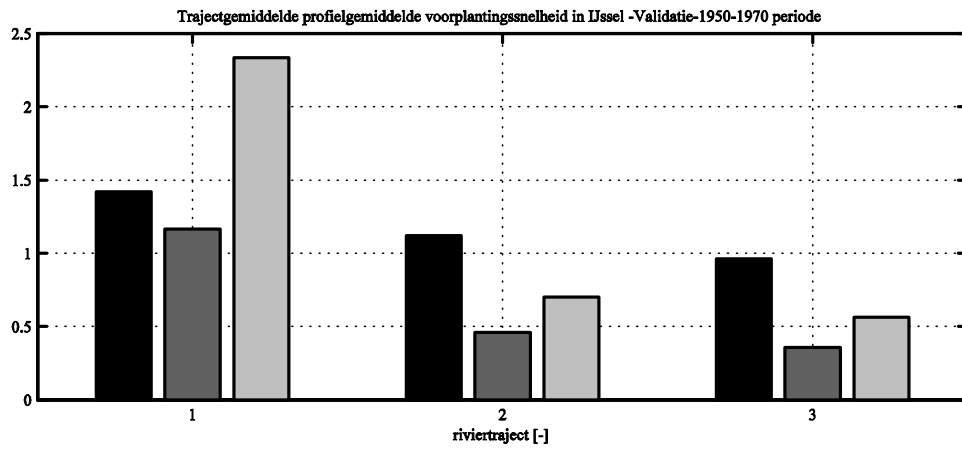
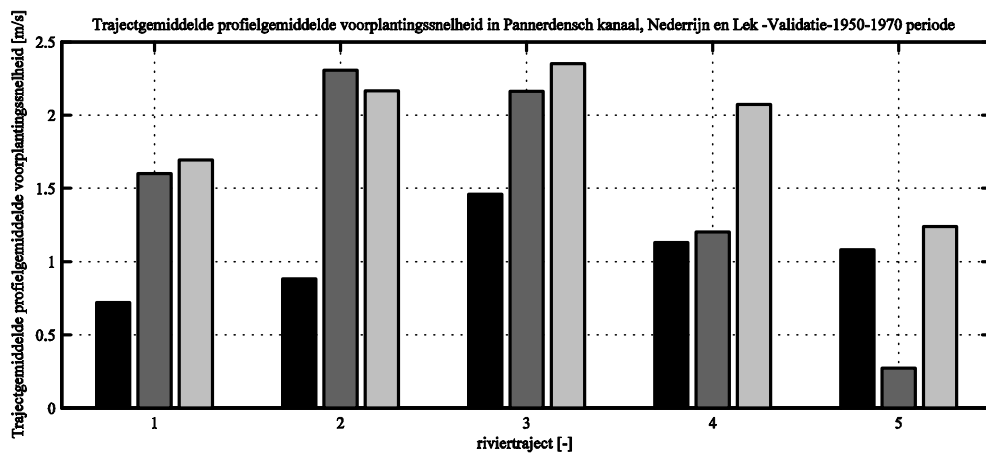
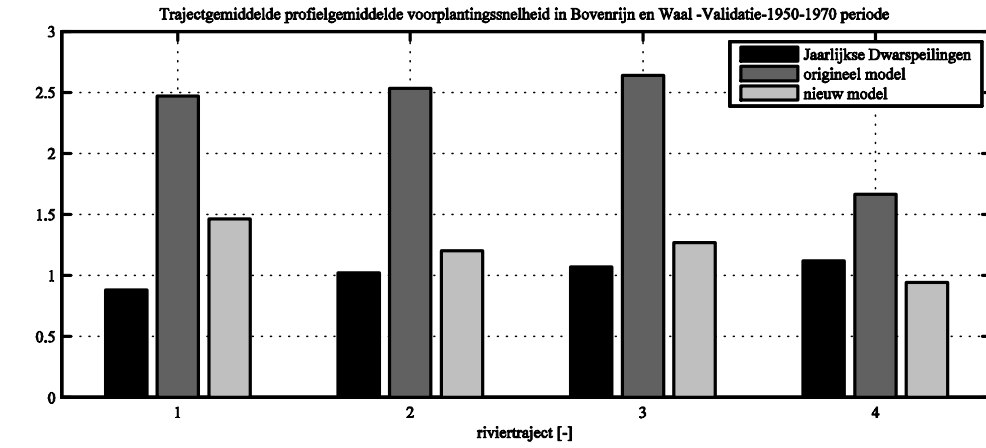
Validatie-1950-1970 (12:07:32 on Tue 28th Feb 2006)



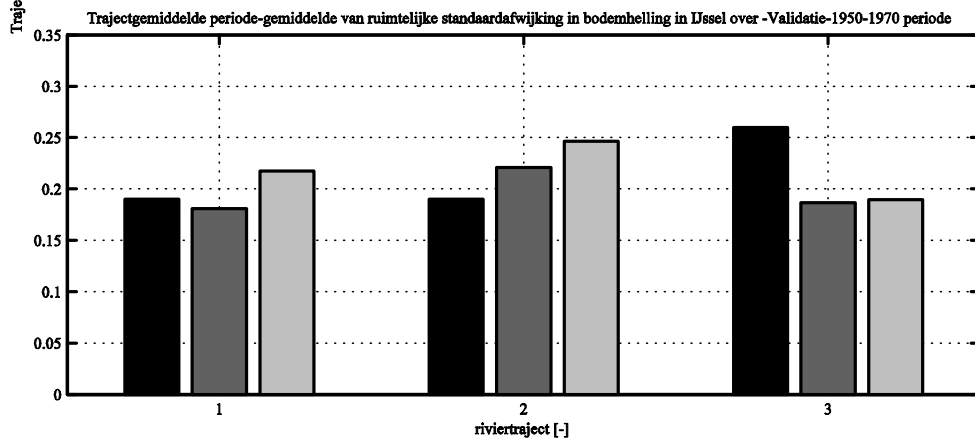
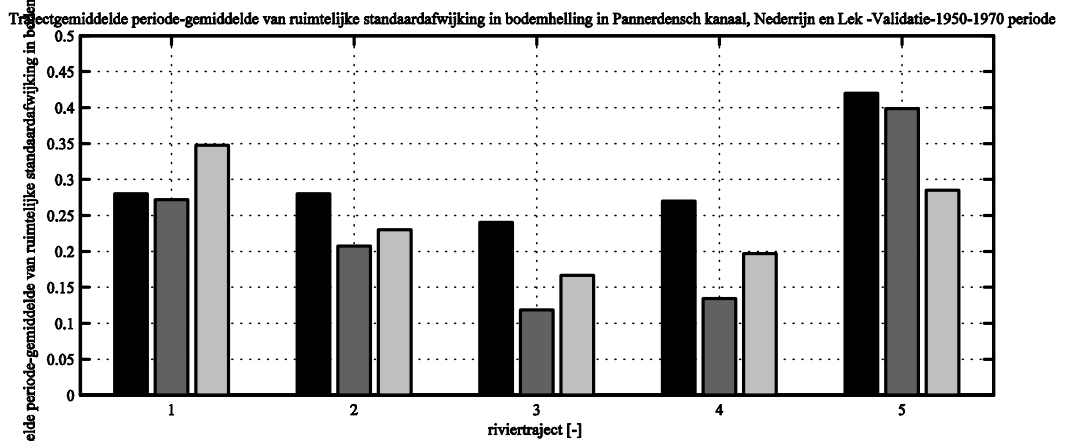
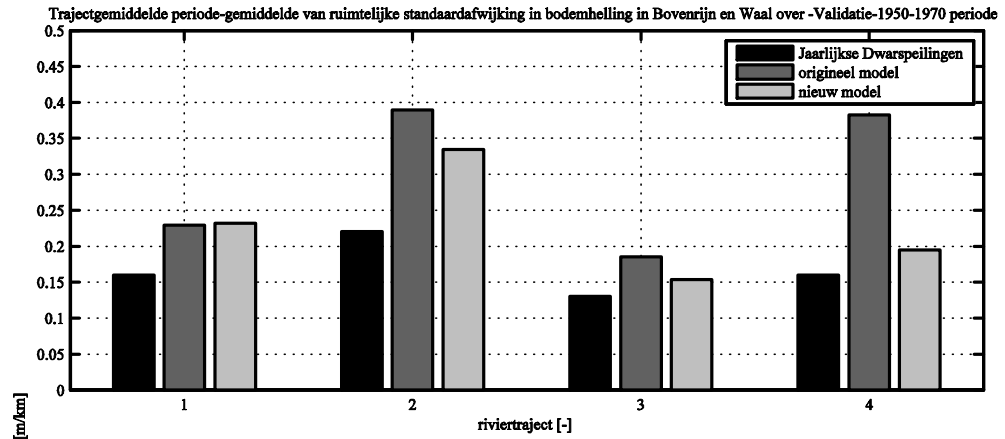
Validatie-1950-1970 (12:07:35 on Tue 28th Feb 2006)



Validatie-1950-1970 (12:07:29 on Tue 28th Feb 2006)

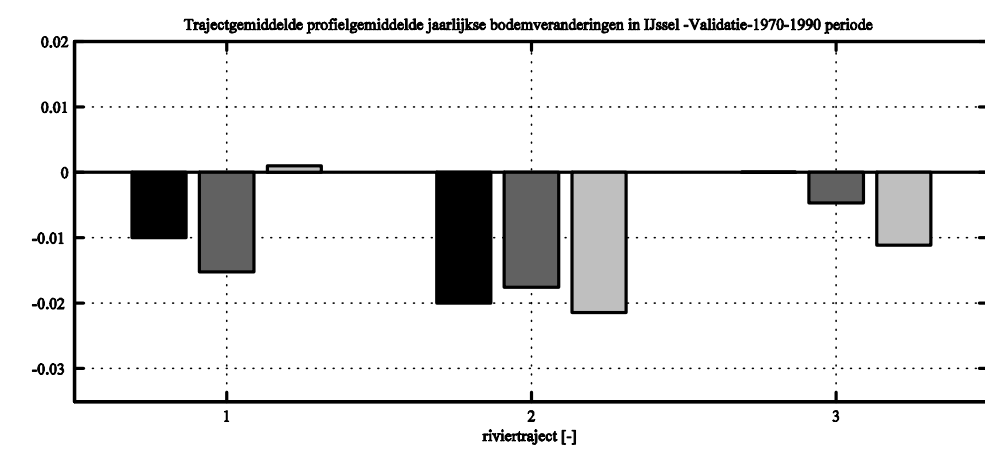
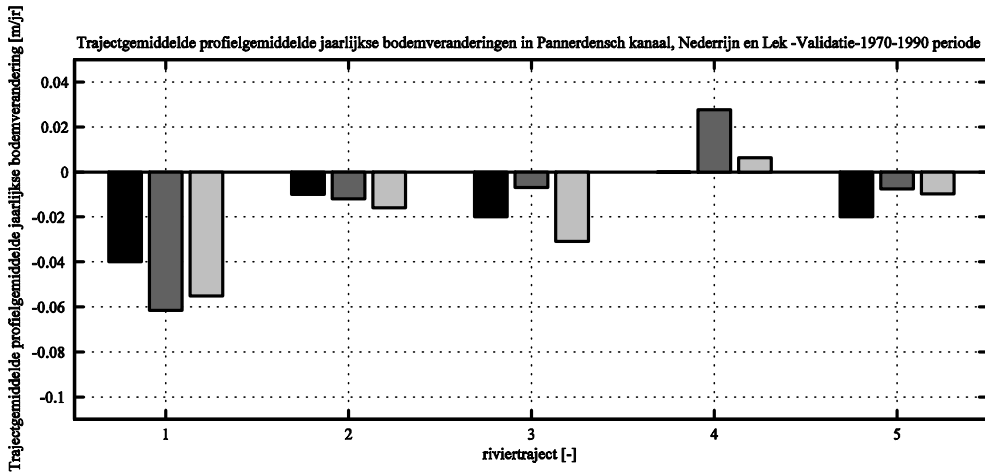
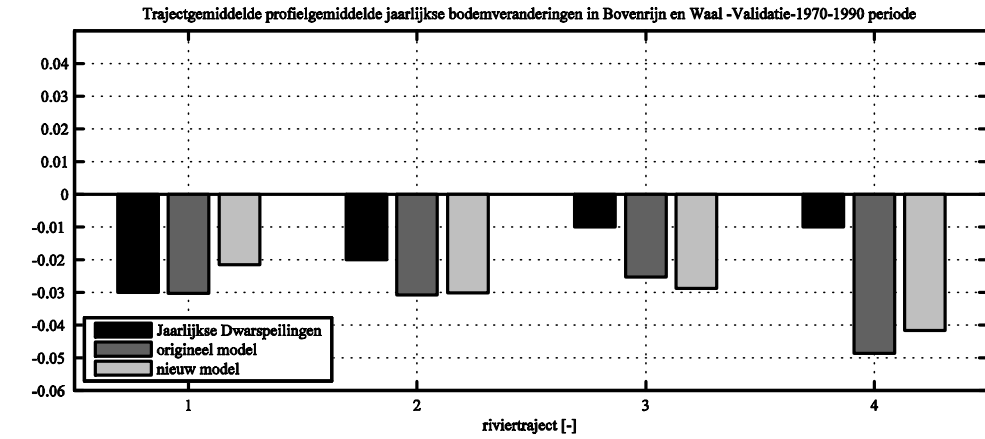


Validatie-1950-1970 (12:07:33 on Tue 28th Feb 2006)



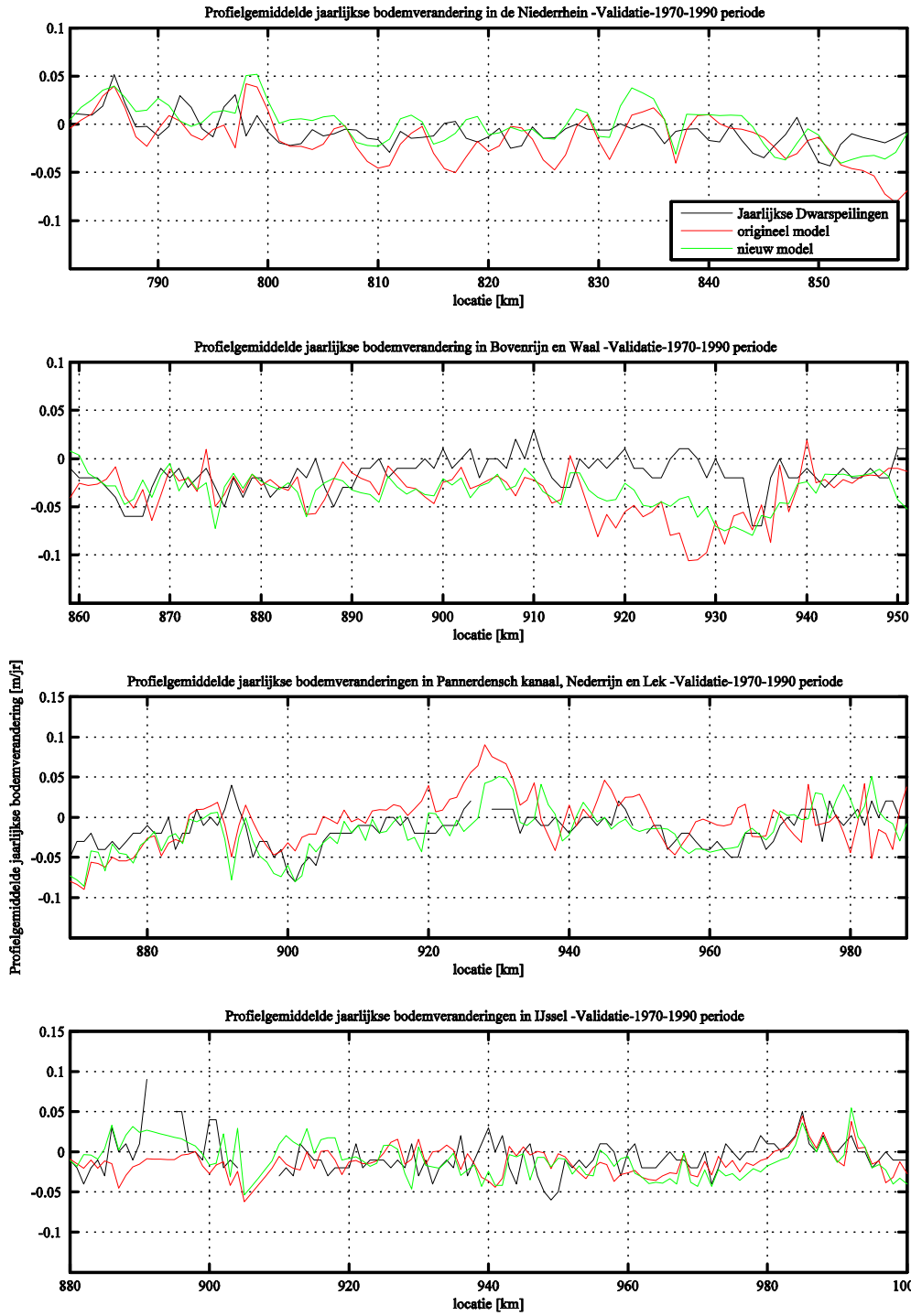
Validatie-1950-1970 (12:07:31 on Tue 28th Feb 2006)

# G Resultaten modelverificatie – periode 1970-1990

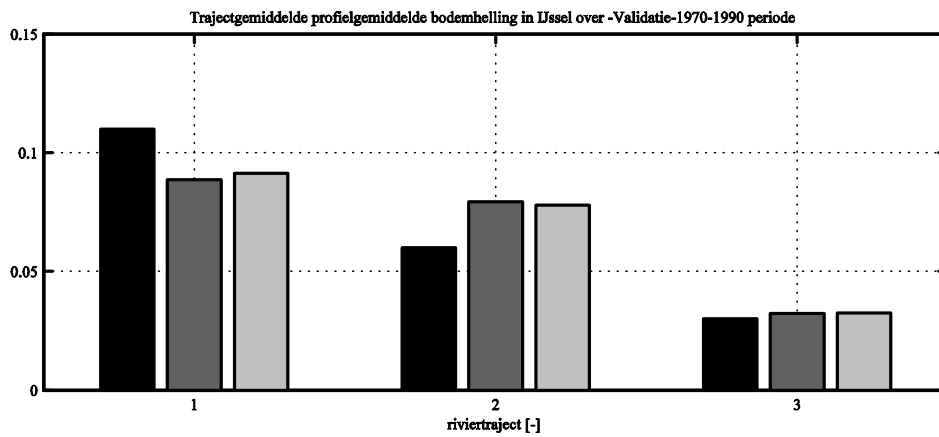
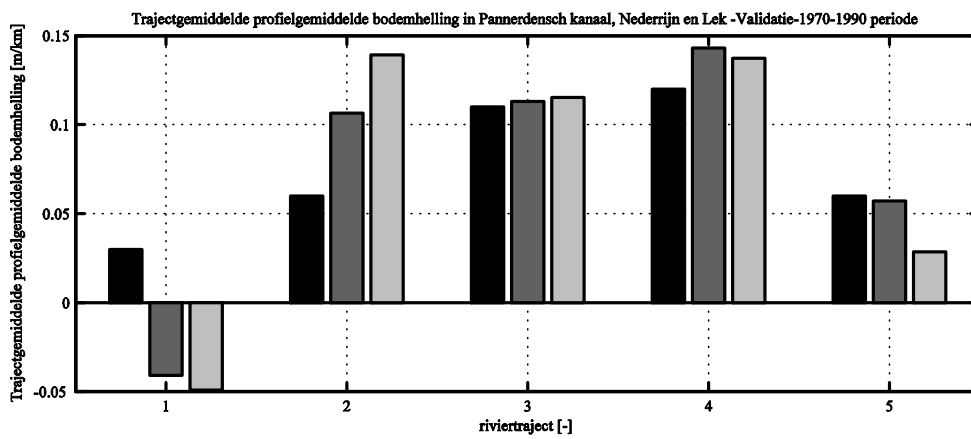
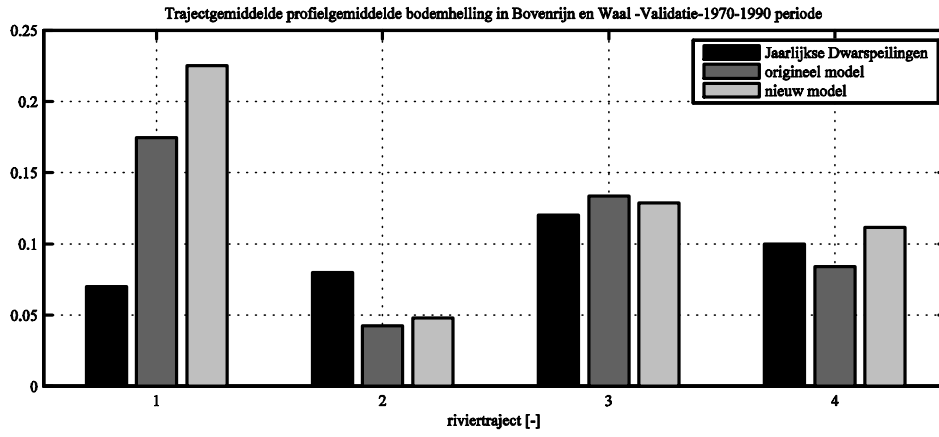


Validatie-1970-1990 (11:20:32 on Thu 2nd Mar 2006)

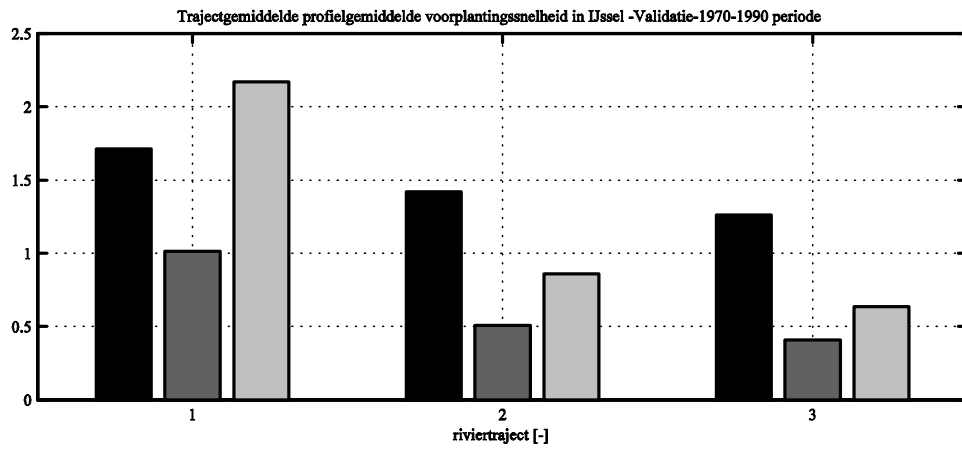
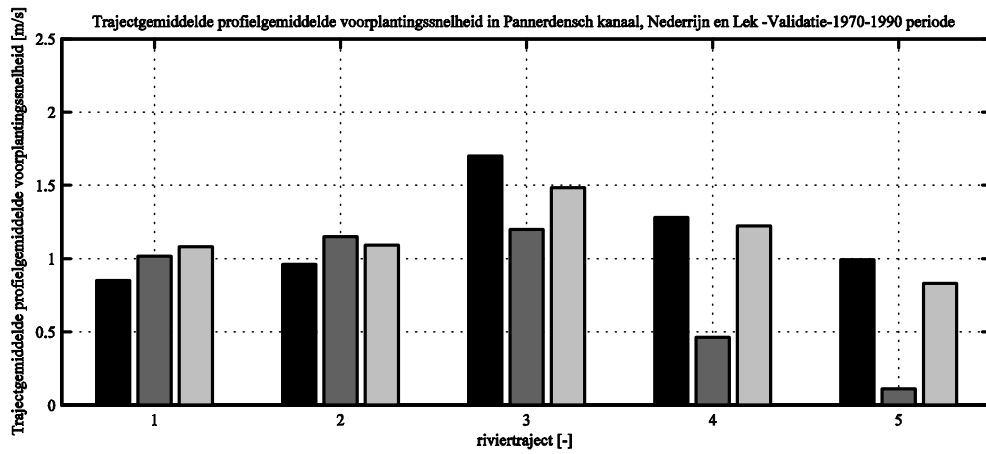
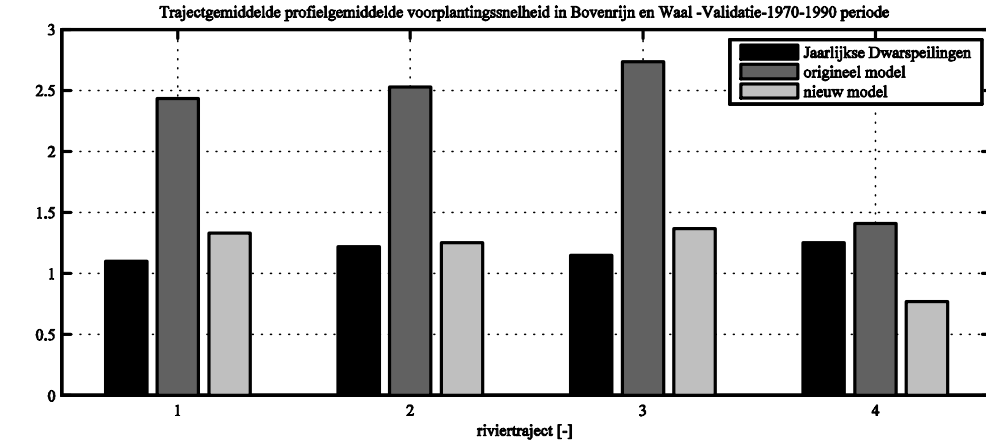




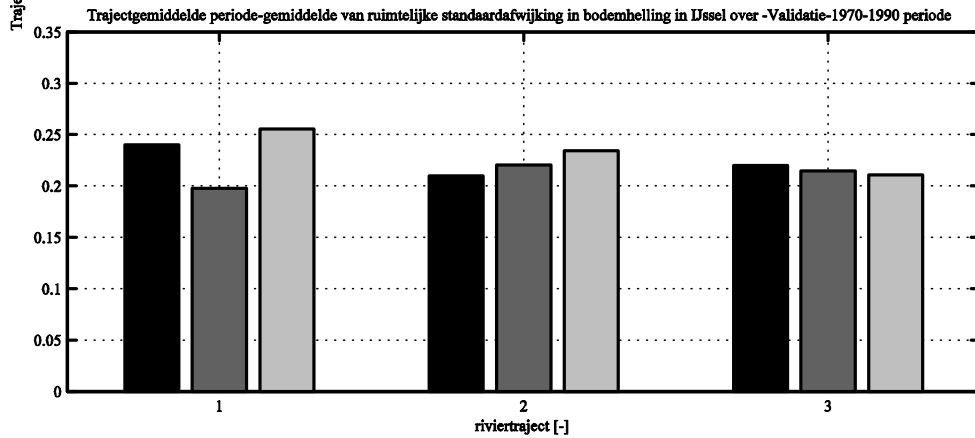
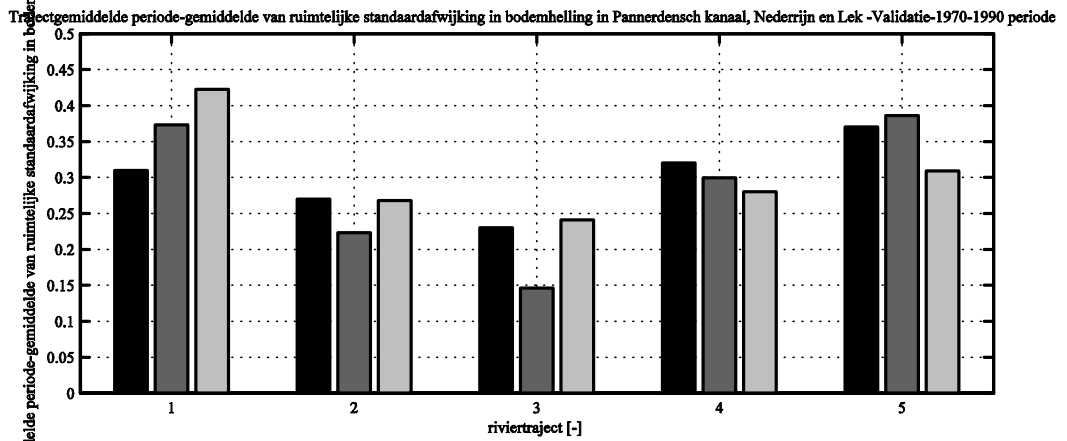
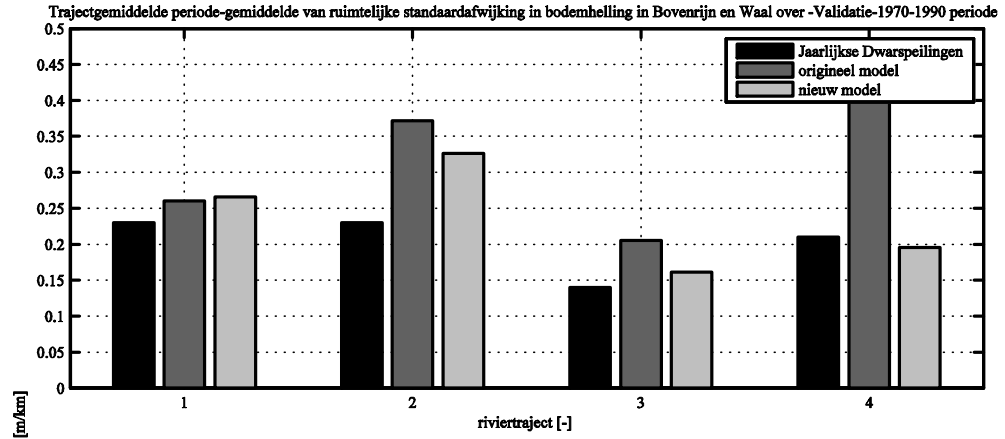
Validatie-1970-1990 (18:38:59 on Fri 24th Feb 2006)



Validatie-1970-1990 (18:38:54 on Fri 24th Feb 2006)



Validatie-1970-1990 (16:38:57 on Fri 24th Feb 2006)



Validatie-1970-1990 (16:38:56 on Fri 24th Feb 2006)



## **WL | Delft Hydraulics**

**Rotterdamseweg 185  
postbus 177  
2600 MH Delft  
telefoon 015 285 85 85  
telefax 015 285 85 82  
e-mail [info@wldelft.nl](mailto:info@wldelft.nl)  
internet [www.wldelft.nl](http://www.wldelft.nl)**

**Rotterdamseweg 185  
p.o. box 177  
2600 MH Delft  
The Netherlands  
telephone +31 15 285 85 85  
telefax +31 15 285 85 82  
e-mail [info@wldelft.nl](mailto:info@wldelft.nl)  
internet [www.wldelft.nl](http://www.wldelft.nl)**

