

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Modellering morfologie van  
Pannerdensche Kop tot Hoek van  
Holland

rapport

juni 2007



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

# Modellering morfologie van Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland

Eelco Verschelling, Kees Sloff & Erik Mosselman

rapport

juni 2007



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1—1</b>
	1.1 Achtergrond.....	1—1
	1.2 Opdracht .....	1—2
	1.3 Organisatie.....	1—3
<b>2</b>	<b>Aanpak voor lange-termijnontwikkelingen .....</b>	<b>2—1</b>
	2.1 Inleiding .....	2—1
	2.2 Eisen aan model.....	2—4
	2.3 Schematisatie van condities.....	2—4
	2.4 Testen van schematisaties van condities.....	2—9
	2.5 Zoutindringing.....	2—13
<b>3</b>	<b>Modelbouw en kalibratie.....</b>	<b>3—1</b>
	3.1 Instrumentarium en basisgegevens .....	3—1
	3.2 Modelbouw.....	3—2
	3.2.1 Hydrodynamisch model.....	3—2
	3.2.2 Morfologisch model .....	3—5
	3.3 Beperkte kalibratie op grootschalige ontwikkeling van de bodem .....	3—9
<b>4</b>	<b>Morfologische berekeningen .....</b>	<b>4—1</b>
	4.1 Beheersscenario's .....	4—1
	4.1.1 Introductie.....	4—1
	4.1.2 Modelbouw .....	4—1
	4.1.3 Resultaten.....	4—4
	4.2 Klimaatscenario .....	4—8
	4.2.1 Introductie.....	4—8

4.2.2	Modelbouw .....	4—9
4.2.3	Resultaten .....	4—11
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>5—1</b>
5.1	Conclusies .....	5—1
5.2	Aanbeveling ten aanzien van hydrodynamische modellen .....	5—1
5.3	Aanbeveling ten aanzien van morfologische modellen .....	5—2
<b>6</b>	<b>Literatuurverwijzingen.....</b>	<b>6—1</b>

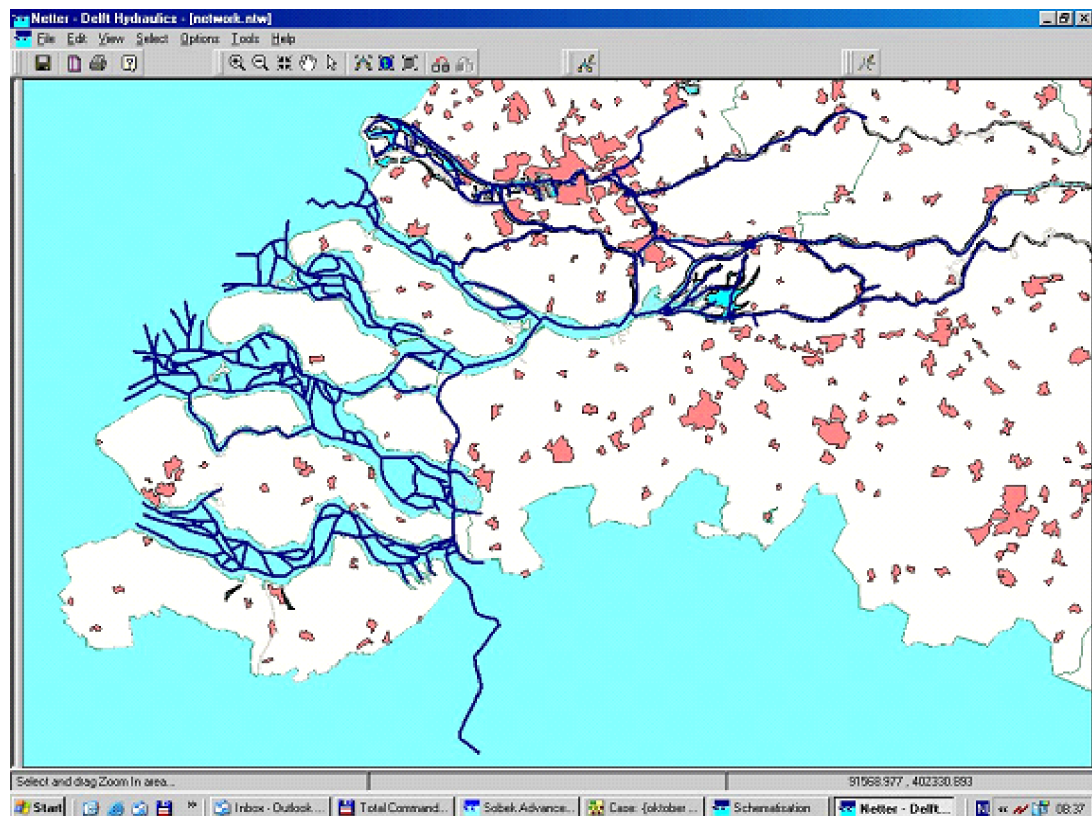
## **Bijlagen**

<b>A</b>	<b>Resultaten test hydraulisch model – SOBEK-RE versus SOBEK-Rivers .....</b>	<b>A—1</b>
<b>B</b>	<b>Resultaten test hydraulisch model – compleet model versus verkort model ..</b>	<b>B—1</b>
<b>C</b>	<b>Overzicht berekeningen voor grootschalige morfologische effecten (Model II) .....</b>	<b>C—1</b>
<b>D</b>	<b>Resultaten morfologische kalibratie – bodemveranderingen.....</b>	<b>D—1</b>
<b>E</b>	<b>Resultaten morfologische kalibratie – sedimenttransporten .....</b>	<b>E—1</b>

# I Inleiding

## I.1 Achtergrond

De bodemligging, waterstanden en afmetingen van de vaarweg tussen Rotterdam en Duisburg veranderen continu onder invloed van zowel natuurlijke processen als menselijk ingrijpen. Behalve voor de scheepvaart, zijn deze veranderingen ook van belang voor veiligheid tegen overstromingen, zoetwatergebruik en natuur. Voor een goed en duurzaam beheer van het traject tussen Lobith en Rotterdam is inzicht nodig in de korte- en lange-termijnveranderingen in bodemligging, waterstanden, vaarwegafmetingen en beheer van dit riviersysteem. Dit inzicht kan worden ontwikkeld door met modelsimulaties voor verschillende scenario's prognoses voor de toekomst te maken en door lange-termijinvloeden van beheer door te rekenen. Een eendimensionaal morfologisch onderzoeksmodel van het riviersysteem tussen de Pannerdensche Kop en Hoek van Holland is daarvoor een belangrijk instrument.



Figuur 1-1. Bestaand SOBEK-model voor waterbeweging en waterkwaliteit in de Rijn-Maasmonding.

Het gewenste eendimensionale morfologische model kan worden gebouwd op basis van een bestaand morfologisch SOBEK-model van de Waal en een bestaand SOBEK-model voor waterbeweging en waterkwaliteit in de Rijn-Maasmonding.

Het bestaande morfologische model van de Waal is een onderdeel van een groter model van de Rijnakken dat recent geschikt is gemaakt voor mengsels van gegradeerd, niet-cohesief sediment (Van Vuren & Sloff, 2006; Sloff, 2006). Voor het bestaande model van de Rijn-Maasmonding (Figuur 1-1) hebben Mosselman et al (2005) de bouwstenen aangegeven die nodig zijn om dit model ook geschikt te maken voor de berekening van morfologische veranderingen als gevolg van slibtransport. Hiervoor werden een korte-termijnspoor en een lange-termijnspoor voorgesteld. Het korte-termijnspoor betreft de inbouw van nieuwe sedimenttransportcapaciteitformules van Van Rijn, die een uitbreiding naar slib inhouden van Van Rijn's oude zandtransportformules. Dit is de aanpak waarvoor in deze opdracht wordt gekozen. Het lange-termijnspoor betreft het bouwen van een koppeling met het waterkwaliteitsmodel DELWAQ op een zodanige manier dat erosie en sedimentatie van de bodem bepaald kunnen worden uit met DELWAQ berekende resuspensie en sedimentatie van slib (Sloff et al, 2007).

## 1.2 Opdracht

In het kader van het Stuurboordproject “Morfologie van de vaarweg” formuleert Rijkswaterstaat voor deze opdracht de volgende onderzoeksvragen:

1. *Definitie van aanpak voor simulatie van lange-termijnontwikkelingen*: Met op huidige kennis gebaseerde onderbouwing definiëren hoe de 1D lange-termijnontwikkelingen in bodemligging en waterstanden van het traject Rotterdam – Pannerdensche Kop gesimuleerd kunnen worden, inclusief de invloed van afvoervariatie, getij, sedimenteigenschappen (zand-slib), watereigenschappen (zoet-zout) en beheer;
2. *Bouw van 1D onderzoeksmodel met hydraulische kalibratie*: Een 1D onderzoeksmodel bouwen van het riviersysteem tussen Rotterdam (modelranden Nieuwe Waterweg en zeemond Haringvliet) en de Pannerdensche Kop, gebruik makend van bestaande hydraulische en morfologische modellen van het systeem. De versie voor deze opdracht simuleert getijdenwerking en erosie en sedimentatie van zand en slib. Een versie met interacties tussen zoet en zout water blijft vooralsnog buiten beschouwing;
3. *Beperkte kalibratie op grootschalige bodemontwikkeling*: Het model beperkt kalibreren op de morfologische ontwikkeling in het gebied in de periode 1973-1999;
4. *Simulaties van een klimaatscenario en een beheerscenario*: Door simulatie met het 1D onderzoeksmodel de invloeden onderzoeken van een klimaatscenario en een beheerscenario op de lange-termijnontwikkeling in waterstanden, bodemliggingen en waterdiepten in het traject Rotterdam – Pannerdensche Kop. Voor het beheerscenario wordt de invloed van zandwinning op de Boven Merwede geschat, in nauwe samenhang met een studie door Mosselman & Wijbenga (2007).

De opdracht is vastgelegd in de overeenkomst RI-4623 betreffende “Model morfologie van Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland”. Het project is bij WL | Delft Hydraulics bekend onder nummer Q4249.



### **I.3 Organisatie**

De opdracht is uitgevoerd door Eelco Verschelling, Kees Sloff en Erik Mosselman, met bijdragen van Zheng Bing Wang en Johan Crebas. Erik Mosselman was de projectleider. Margriet Schoor, Arjan Sieben, Jasper Hugtenburg en Marcel Bruggers begeleidden het project vanuit Rijkswaterstaat RIZA in samenspraak met zowel Rijkswaterstaat Oost Nederland als Rijkswaterstaat Zuid-Holland.



## 2 Aanpak voor lange-termijnontwikkelingen

### 2.1 Inleiding

In het eendimensionale model voor de Rijntakken worden processen beschouwd met een lengteschaal die in de orde ligt van enkele kilometers. Deze lengteschaal is in ieder geval groter dan de breedte van de rivier. Daarbij zijn tijdschalen te onderscheiden voor stromingsverschijnselen (getijde, voortplanting van afvoergolven) en trajectgemiddelde morfologische processen ('autonome' bodemdaling, 'downstream fining'). Over het algemeen geldt in de Waal, de Maas en de Rijn-Maasmonding dat de morfologische veranderingen klein kunnen worden verondersteld gedurende periodes op de karakteristieke tijdschaal voor de hydrodynamica. De morfologische tijdschaal is namelijk vele orden groter. De karakteristieke tijdschalen voor de waterbeweging liggen in de orde van een dag tot enkele weken (getijde, afvoergolf), terwijl die van de morfologie liggen in de orde van maanden tot jaren.

Het onderscheid tussen verschillende tijdschalen kan gebruikt worden voor het versnellen van langjarige simulaties. Tijdwinst kan bijvoorbeeld worden geboekt door het aantal rekenintensieve stappen te reduceren, of door het rekenproces te vereenvoudigen door bewerkingen die nodig zijn voor kleinere tijdschalen uit het algoritme te verwijderen (bijvoorbeeld met behulp van een quasi-stationaire aanpak, waarbij de stroming stationair wordt beschouwd voor de morfologische tijdschaal).

In de praktijk zijn er verschillende methoden gangbaar voor het versnellen van de berekeningen, waaronder (Latteux, 1995, Roelvink, 2006):

- Schematisatie van veranderingen in stroombeeld ten gevolge van morfologische veranderingen:
  - Continuïteitscorrectie: deze methode wordt toegepast om het stroomsnelheidsveld zonder volledige hydrodynamische simulatie aan te passen aan een kleine bodemverandering. Verondersteld wordt dat de afvoer en de waterstand gelijk blijven, en dat de morfologische verandering leidt tot een aanpassing van waterdiepte en daarmee een aanpassing van de stroomsnelheid. Vervolgens kunnen daarmee de nieuwe sedimenttransportgradiënten worden berekend. Gedurende een aantal morfologische tijdstappen kan zo een rekenintensieve hydrodynamische berekening worden vervangen door een snelle correctiemethode.
  - Getijdemiddeling: deze klassieke methode veronderstelt dat morfologische veranderingen gedurende één getijdencyclus aanzienlijk kleiner zijn dan trends over lange termijn, en dat deze dus de waterbeweging op kleine tijdschaal nauwelijks beïnvloeden. De gradiënten in de getijdegemiddelde transporten over een beperkte periode worden gebruikt voor het berekenen van de grootschalige morfologische veranderingen over een lange 'morfologische periode'. Deze aanpak wordt meestal gecombineerd met continuïteitscorrectie.

- Quasi-stationaire berekening: dit kan worden beschouwd als een variant van de getijdemiddeling. Verondersteld wordt dat de waterbeweging op de grote morfologische tijdschalen als min of meer stationair kan worden beschouwd per morfologische tijdstap. Als het model beschikt over een speciaal oplossingsalgoritme voor stationaire waterbeweging, zal het aantal waterbewegingssimulaties aanzienlijk worden beperkt, omdat dan gerekend wordt met grote tijdstappen. De dynamica van een getij kan daardoor niet meer worden gesimuleerd, en het effect ervan op sedimenttransport en morfologie ontbreekt.
- De RAM aanpak (Rapid Assessment of Morphology): dit is een simpele methode die voor Delft3D-simulaties wordt toegepast. De methode corrigeert sedimenttransporten op een manier die vergelijkbaar is met de aanpassing van stroomsnelheden in de continuïteitscorrectie. Daarbij wordt verondersteld dat het sedimenttransport een machtsfunctie is van de waterdiepte, zodat een eenvoudig oplossingsalgoritme volstaat. Deze aanpak wordt inmiddels veel toegepast in de kustmorfologiepraktijk.
- Vergroting van effectieve morfologische tijdstap:
  - De ‘online’ aanpak met morfologische versnellingsfactor: met deze aanpak worden alle processen (waterbeweging, transport en actualisering van de bodem) gesimuleerd met dezelfde kleine tijdstap (‘flow-tijdstap’). De berekende bodemveranderingen worden echter vermenigvuldigd met een morfologische versnellingsfactor om tegemoet te komen aan de verschillen in tijdschalen. Voor een getijdesituatie betekent dat een met factor  $n$  berekende morfologische verandering over een periode van 1 getij overeenstemt met de echte morfologische verandering over een periode van  $n$  getijden. Dit is vergelijkbaar met het concept van ‘verlengd getij’ van Latteux (1995).
- Schematisatie van invoercondities:
  - Reductie van het aantal condities en schematisatie van de condities: dit betreft een vereenvoudiging van de stromingsberekeningen door selectie van een representatieve set van afvoer- en waterstandscondities. Voorbeelden zijn de vervanging van een gemeten afvoertijdreeks door een constante karakteristieke (‘morfologische’) afvoer, een statistisch afgeleide kenmerkende afvoerreeks van één jaar die telkens kan worden herhaald, een schematisatie van deze kenmerkende afvoerreeks tot een beperkt aantal constante afvoersteps en het gebruik van een representatief getij uit een springtij-doodtijcyclus volgens de methode van Latteux (1987, 1995).

Voor al deze methoden geldt dat ze alleen mogen worden toegepast wanneer ze geen noemenswaardige afwijkingen in het morfologische gedrag veroorzaken. Daarnaast moet worden voorkomen dat de simulaties instabiel worden, of dat ook de langjarige grootschalige trends worden weggefilterd. Voor de gecombineerde getij- en rivierstroming in de Rijn-Maasmonding spelen de volgende aspecten daarbij een rol:

- Gerealiseerd moet worden dat door sterke niet-lineariteit van de processen, het gemiddelde effect van variërende randcondities anders kan zijn dan het effect van de gemiddelde waarde van deze randcondities. Bijvoorbeeld in de situatie met getij zal het sedimenttransport bij hoge eb- of vloedstroomsnelheden relatief meer bijdragen dan de lagere stroomsnelheden wanneer wordt verondersteld dat sedimenttransport  $s$  kan worden geformuleerd als een machtswet van de stroomsnelheid  $u$ :  $s = m \cdot u^n$  met  $n > 3$ . In dat geval volgt voor het transport gemiddeld over een getijperiode dat:

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m \bar{u}^n < \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k m u^n \right) \quad (2-1)$$

Het middelen van de hydrodynamica voordat transporten zijn berekend levert een lager netto transport op dan het middelen van verschillende transporten die afzonderlijk zijn berekend tijdens de getijcyclus.

- De chronologie van gebeurtenissen, zoals de passage van afvoergolven, kan een belangrijke invloed hebben op de resultaten wanneer sprake is van vertraagde reacties op afvoervariaties. De periodieke opbouw en afbraak van zandgolven tijdens de jaarlijkse hoogwaterafvoeren van de rivier is bijvoorbeeld een functie van de duur en de grootte van de afvoer, en is dus gevoelig voor de karakteristieken van de afvoergolf. Een ander voorbeeld is het vrij komen van in het systeem afgezet slib tijdens de eerste rivierafvoerpiek, waarna slibconcentraties in daarop volgende pieken geringer zijn doordat het slib alleen nog via de randen binnenkomt en niet meer wordt gevoed vanuit de bodem in het systeem zelf. Daarbij is de duur van de laagwaterperiode en de volgorde van de hoogwaters op de rivier van belang.
- In het deltagebied in de Rijn-Maasmonding leidt de getijbeweging tot complexe stroming in de verschillende takken. De invloed van het getij dringt tijdens lage rivierafvoeren tot ver landinwaarts door (bijvoorbeeld tot Tiel op de Waal en tot Vianen op de Lek). Bij hoogwaterafvoer ligt de invloedsgrens verder stroomafwaarts. Hierdoor is sprake van een relatief groot traject waar de overgang tussen rivierafvoer- en getijgedomineerde stroming optreedt.
- Langjarige trends in afvoeren, waterstanden en dergelijke moeten meegenomen worden in de simulaties. In de Rijn zijn deze trends bijvoorbeeld toe te schrijven aan klimaatveranderingen (zeespiegelrijzing, afvoerverlopen). De tijdschalen hiervan zijn aanzienlijk groter dan die van getij- of seizoensafhankelijke rivierafvoervariaties.

De traditionele methoden met getijmiddeling, continuïteitscorrectie of quasi-stationaire simulatie vereisen een simulatie met complexe tijdshuishouding, en vereisen in de praktijk een ontkoppeling van stromings- en morfologiemodules. In de oude versies van SOBEK (SOBEK-RE) en Delft3D was dit een standaard aanpak voor morfologiesimulaties. Vanuit het oogpunt van gebruiksgemak en efficiëntere en robuustere software-implementatie is in de afgelopen jaren geleidelijk overgegaan naar de aanpak met een morfologische factor. Ook voor de Rijn-Maasmondingmodellen is hiermee geëxperimenteerd.

## 2.2 Eisen aan model

Bij het versnellen van de berekening zijn de volgende eisen relevant:

- Het model moet in staat zijn de langjarige evenwichtssituatie te simuleren.
- Het model moet het tijdsafhankelijke gedrag van grootschalige morfologische veranderingen (lengteschalen van enkele kilometers, tijdschalen in de orde van een jaar) kunnen simuleren.
- Het model moet effecten van bodemsamenstelling en de interactie hiervan met de morfologische ontwikkeling kunnen simuleren.

Voor het model van de Pannerdensch Kop tot aan Hoek van Holland ligt de nadruk op het berekenen van grootschalige morfologische processen met lengteschalen van tientallen kilometers en tijdschalen van minimaal enkele jaren. Voor deze morfologische verschijnselen zijn de details van hydrodynamische verschijnselen met tijdschalen in de orde van een getij, of zelfs van een springtij-doodtijcyclus, niet relevant. Volstaan kan worden met een benadering of middeling van de residuele stromingen die door het getij worden opgewekt.

## 2.3 Schematisatie van condities

Het versnellen van de morfologische berekening door een schematisering van de condities (volgens de in Paragraaf 2.1 genoemde methoden) is slechts beperkt mogelijk vanwege de combinatie van getij en rivierafvoeren. Bij de schematisatie van condities in het model moet zowel op de getijranden als op de afvoerranden worden ingegrepen. In deze paragraaf wordt beschreven welke mogelijkheden voor het model van de Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland zijn overwogen, en wordt geanalyseerd wat deze methoden betekenen voor de oplossingen. Het betreft methodes voor middeling van het getij en een methode met een morfologische factor.

De randcondities zijn in principe het getij bij Hoek van Holland, het getij bij de monding van het Haringvliet (zeezijde) en de tijdsafhankelijke rivierafvoer bij de Pannerdensch Kop. Voor de monding van het Haringvliet geldt dat het getij door de dam geheel of gedeeltelijk wordt tegengehouden. Voor de morfologie van het Haringvliet en het Hollands Diep is de invloed van de sluizen op de stroming van groot belang. Bij Hoek van Holland wordt het getij opgelegd met daarin eb en vloed en de cyclus van spring- en doodtij. Een goede weergave van deze cyclus vergt een periode van minimaal 1 maand met een tijdstap van minder dan circa 1 uur. De invloed van het getij dringt relatief ver door in het model, met name tijdens de lage rivierafvoeren. Voor de rivierafvoeren is vooral de seizoensafhankelijke variatie met natte en droge perioden van belang. De desbetreffende cyclus heeft een tijdschaal van weken tot maanden.

In het verleden werd in SOBEK-RE vaak gerekend met getijdemiddeling, waarbij getijgemiddelde netto transporten werden bepaald voor het berekenen van morfologische veranderingen over een lange periode. In simulaties met een netwerk van rivier- en estuariumtakken met veel splitsingen en samenvloeiingen bleek dit in SOBEK niet te leiden tot betrouwbare oplossingen.

De oorzaak daarvan ligt in de empirische maar slecht bekende relaties voor de verdeling van sediment op splitsingspunten en in de numerieke afhandeling ter plaatse van splitsingen en samenvloeiingen.

Inmiddels is het voor estuaria en zeeën gebruikelijk te rekenen met een morfologische factor. De berekening wordt dan uitgevoerd als een normale hydraulische berekening (met bijbehorende kleine tijdstap), maar de morfologische veranderingen worden vermenigvuldigd met een factor. In de simulatie en de uitvoer van resultaten kunnen dan twee typen “tijd” worden onderscheiden:

- De “hydraulische tijd” is de tijd (tijdstap, periode) waarmee de stromingsberekening wordt gemaakt.
- De “morfologische tijd” is de tijd die hoort bij de uitvoer van berekende bodemveranderingen, en is gelijk aan de hydraulische tijd vermenigvuldigd met de morfologische factor.

Het morfologische resultaat van de berekening kan dan geïnterpreteerd als bodemveranderingen op de morfologische tijd. Uit de praktijk is gebleken dat de morfologische veranderingen voor getij-gedomineerde situaties in dit geval qua nauwkeurigheid vergelijkbaar zijn met de resultaten verkregen met getijdemiddeling. Het voordeel van deze methode is dat de koppeling tussen stroming en morfologie wordt behouden, wat zowel vanuit wiskundig oogpunt (aard van het stelsel vergelijkingen) als vanuit numeriek oogpunt (gekoppelde oplossingsmethode) beter is. Daarentegen is ook in deze aanpak zorgvuldigheid geboden ten aanzien van interacties tussen dynamische processen met verschillende tijdschalen.

In de morfologische berekeningen voor een rivier-estuariumstelsel is het noodzakelijk zowel de getij-invloed als het afvoerregime van de rivier correct te schematiseren. Voor het model van de Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland is vooral het grootschalige gedrag van belang (tijdschalen in de orde van een jaar). De tijdschalen van getij-invloeden zijn een orde kleiner en mogen daarom worden berekend met behulp van een morfologische factor mits de tijdschaal vermenigvuldigd met deze factor klein blijft ten opzichte van de morfologische schalen. Gerealiseerd moet worden dat niet alleen de tijdschaal van een enkele eb- en vloedcyclus maar ook de tijdschaal van spring- en doortijcyclus (orde 1 maand) moet worden beschouwd wanneer deze effecten relevant worden geacht. De tijdschalen van seizoensafhankelijke rivierafvoeren liggen echter wel in dezelfde orde van grootte als relevante morfologische processen. Hiervoor is het gebruikelijk de tijdsduren van de afvoertijdreeks door de morfologische factor te delen alvorens deze als randconditie op te leggen. Hierdoor wordt voorkomen dat op morfologische tijd de afvoerhydrograaf wordt uitgerekt tot een zeer lange periode van hoogwater, gevolgd door een lange periode van laagwater. In tegenstelling tot getijcondities wordt de rivierafvoerconditie dus als het ware op de morfologische tijd opgelegd. De aanpak in deze situaties is dan ook samen te vatten als:

- Tijdsafhankelijke (periodieke) condities met een tijdschaal veel kleiner dan die voor morfologie worden onvervormd opgelegd op basis van de hydraulische tijd. Dit geldt bijvoorbeeld voor het getij.

- Tijdsafhankelijke (periodieke) condities met een tijdschaal even groot of groter dan die voor morfologie worden opgelegd op basis van de morfologische tijd (dat betekent dus een verkorting van de tijdsduur wanneer deze condities worden opgelegd in de hydraulische tijd).

Hoewel de bovengenoemde schaling voor getij met relatief grote factoren kan worden toegepast, kan voor het schematiseren van de variërende rivierafvoer slechts met relatief kleine morfologische factoren worden gewerkt. Dit heeft te maken met de volgende karakteristieken van de hoogwatergolf (opgelegd als randconditie op een instroomrand) en de bijbehorende invloed op de morfologie:

- De top van de hoogwatergolf verplaatst zich stroomafwaarts met een snelheid (bij benadering afgeleid uit een diffusiemodel):

$$c = \frac{3}{2} u \frac{B_s}{B} \quad \text{met} \quad c \leq \frac{3}{2} u \quad (2-2)$$

waarin  $B_s$  = stroomvoerende breedte,  $B$  = bergende breedte (breedte van momentane wateroppervlak),  $c$  = snelheid van de top van de hoogwatergolf,  $u$  = dwarsprofielgemiddelde stroomsnelheid. Er geldt dus dat de golf zich verplaatst met een snelheid die in dezelfde orde van grootte ligt als de stroomsnelheid (convectie, onafhankelijk van de morfologische factor). In opschaling naar een morfologische tijd loopt de afvoergolf door het systeem met een snelheid die gelijk is aan bovengenoemde snelheid gedeeld door de morfologische factor.

- De diffusie of demping van de golf wordt bepaald door de diffusiecoëfficiënt (volgens het diffusiemodel) als:

$$K = \frac{C^2 B_s^2 h^3}{2QB} \quad (2-3)$$

Waarin  $C$  = Chézycoëfficiënt,  $h$  = waterdiepte,  $K$  = diffusiecoëfficiënt. De desbetreffende afvlakking van de golf is een functie van het volume van de golf en deze diffusiecoëfficiënt. In een ruwe benadering kan worden afgeleid dat de amplitude van de golf of de hoogte van de afvoerpiek die aan de bovenrand is opgelegd, in de tijd afneemt volgens

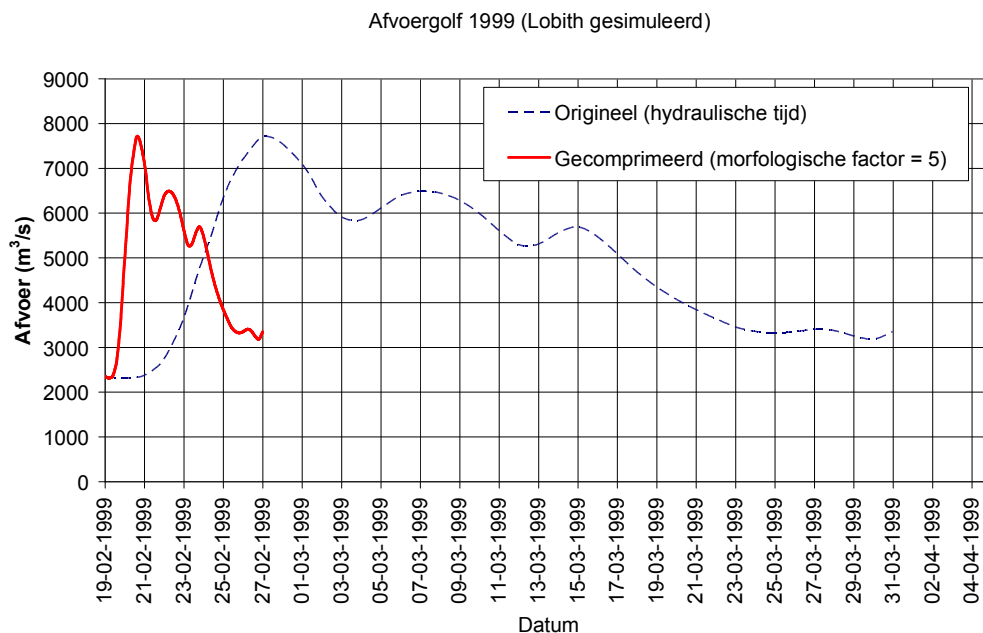
$$\frac{dh_{\text{piek}}}{dt} = - \frac{V}{4\sqrt{\pi K t^3}} \quad (2-4)$$

Daarin is  $V$  het volume van de afvoergolf per eenheid van breedte en  $t$  de tijd na binnenkomst door de rand.

- Zowel de weerstand als de verhouding tussen bergende en stroomvoerende breedte speelt in bovengenoemde golfgedrag een belangrijke rol. Naarmate de berging in het systeem afneemt (zodat  $B$  gelijk wordt aan  $B_s$ ) zullen  $c$  en  $K$  toenemen, en zal de golf sneller lopen en meer worden gedempt. Dit effect wordt niet beïnvloed door de morfologische factor.



- In vergelijking (1-4) is de demping van de golf evenredig met de verhouding tussen volume en de wortel van de diffusiecoëfficiënt maal de tijd. Door deze verhouding dempt een golf met een kleiner volume  $V$  relatief sneller uit dan een golf met een groot volume. Wanneer een afvoerreeks wordt “ingedrukt” met een morfologische factor, wordt effectief het volume in de golf verkleind. Figuur 2-1 geeft een voorbeeld van hoe de vorm van de hoogwaterafvoer in de periode februari-maart 1999 wordt gecompriemd met een morfologische factor. Het volume in de resulterende golf is met een factor 5 afgenomen. Dit heeft een significant effect op de afname van de piek van de golf.
- In de Rijntakken, met uiterwaarden en afvoerafhankelijke ruwheden, is niet eenvoudig te voorspellen in hoeverre de door de morfologische factor veroorzaakte vervorming en (relatieve) versnelling van hoogwatergolven de grootschalige morfologie beïnvloedt.



Figuur 2-1. Hoogwaterperiode 1999 voor en na aanpassing met een morfologische factor.

In bovengenoemde beschouwingen wordt verondersteld dat eventuele kleinschalige morfologische effecten (bijvoorbeeld zandgolven met lengte van een kribvak) niet noemenswaardig interacteren met de grootschalige processen (bijvoorbeeld autonome bodemdaling). Daarnaast is het niet duidelijk hoe groot de invloed is op grootschalige processen. Om dit te onderzoeken worden in Paragraaf 2-4 enkele testen uitgevoerd met het Rijntakkenmodel. Daaruit blijkt dat een morfologische factor hoger dan 5 à 10 niet is aan te bevelen.

In het rivierafvoer-gedomineerde deel van de Rijntakken (Waal, Merwedens, Amer, etc.) bevinden zich trajecten waarbij wel een getij-invloed merkbaar is, maar waarbij stroomsnelheden gedurende de hele simulatie positief blijven. Wanneer alleen deze trajecten worden beschouwd in het model, bijvoorbeeld door benedenstroomse takken van het model af te knippen, is een verdere vereenvoudiging mogelijk door gebruik te maken van een aanpassingsfactor voor getij-invloed.

In deze methode wordt de simulatie met een rivierafvoer zonder getij berekend, waarna de lokale invloeden van het getij worden verdisconteerd in lokale modificaties van de (“bedvormende”) afvoer  $Q_b$ . De gemodificeerde afvoer wordt aangeduid met  $Q_{bm}$ . Het is ook mogelijk deze correctie toe te passen op bodem- of totaaltransport.

Het sedimenttransport ten gevolge van louter de rivierafvoeren is op iedere locatie evenredig met de lokale stroomsnelheid  $u_b$  die volgt uit de SOBEK-berekeningen met een constante waterstand op zee. Het totale sedimenttransport ten gevolge van zowel rivierafvoeren als getijdenwerking is op iedere locatie evenredig met de over het representatieve getij gemiddelde waarde van de lokale stroomsnelheden  $u$  tot de macht  $n$ . Dit betekent

$$\frac{S_{\text{tot}}}{S_{\text{riv}}} = \frac{\overline{u^n}}{u_b^n} \quad (2-5)$$

waarin:

- $S_{\text{riv}}$  = sedimenttransport ten gevolge van louter rivierafvoer ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $S_{\text{tot}}$  = totaal sedimenttransport ten gevolge van rivierafvoer en getijdenwerking ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $u$  = lokale stroomsnelheid die met het getij rond  $u_b$  varieert ( $\text{m/s}$ )
- $u_b$  = lokale bedvormende stroomsnelheid ten gevolge van louter rivierafvoer ( $\text{m/s}$ )

Omdat de “bedvormende” afvoer gedefinieerd is op basis van een middeling van afvoeren tot de macht  $n/3$ , geldt de volgende relatie:

$$\frac{S_{\text{tot}}}{S_{\text{riv}}} = \left( \frac{Q_{bm}}{Q_b} \right)^{n/3} \quad (2-6)$$

waarin:

- $Q_b$  = lokale bedvormende afvoer ten gevolge van louter rivierafvoer ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $Q_{bm}$  = lokale bedvormende afvoer ten gevolge van rivierafvoer en getijdenwerking ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Combinatie van de vergelijkingen (2-5) en (2-6) geeft de volgende relatie voor lokale modificaties van bedvormende afvoeren:

$$\frac{Q_{bm}}{Q_b} = \left[ \frac{(\overline{u^n})^{1/n}}{u_b} \right]^3 \quad (2-7)$$

Uit bovengenoemde relaties kan worden afgeleid dat door de getij-invloed netto meer transport zal optreden dan wanneer met alleen rivierafvoeren wordt gerekend. Hoewel dit principe zijn praktische waarde kan hebben, zou het voor het model van de Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland een omvangrijke klus zijn om de modificaties te bepalen.

De factoren zijn namelijk een functie van de plaats (afhankelijk van de doordringing van de getij-invloed) en van de rivierafvoer.

## 2.4 Testen van schematisaties van condities

In voorgaande paragraaf zijn enkele mogelijke schematisaties van condities gepresenteerd die kunnen worden toegepast om de berekeningen te versnellen. Gezien de complexe interacties in het model is een kwantitatief onderbouwde aanbeveling alleen mogelijk door deze schematisaties te testen. De testen zijn beperkt tot de aanpak met een morfologische factor en de aanpak met een aanpassing van het transport of van de bedvormende afvoer voor getij-invloeden.

### Testen met invloed van getij op (bedvormende) transport

Het effect van de getijbeweging op de transporten kan worden bepaald door de berekende stroomsnelheden van simulaties met en zonder getijden met elkaar te vergelijken. Voor deze analyse kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van de SOBEK-modellen voor de benedenloop van de Waal en de Merwedde. Uit de SOBEK-resultaten kan worden afgeleid dat de getijbeweging ter hoogte van Gorinchem tijdens lage rivierafvoeren redelijk kan worden benaderd met de harmonische componenten M2 en M4:

$$h(T) = H_0 + H_i \cdot \cos(\omega_i \cdot T + \varphi)$$

waarin:

$H_0$	=	gemiddelde waterstand (m)
$H_i$	=	amplitude van component $i$ (m)
$\omega_i$	=	hoeksnelheid van component $i$ ( $s^{-1}$ )
$\varphi_i$	=	fase van component $i$ (-)

$$h_{M1} = 0,15 \cdot \cos(28,984 \cdot T + 29)$$

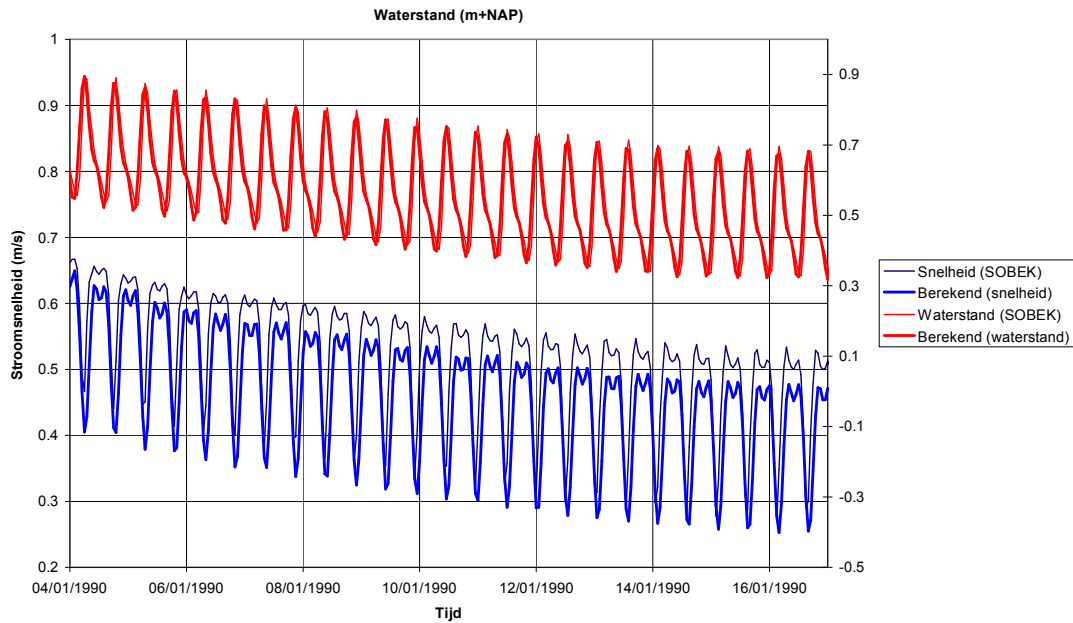
$$h_{M4} = 0,06 \cdot \cos(57,968 \cdot T + 120)$$

Voor de stroomsnelheid kan op vergelijkbare manier de stroomsnelheid worden benaderd met behulp van de M2- en M4-componenten van de getijbeweging:

$$u_{M1} = 0,10 \cdot \cos(28,984 \cdot T + 190)$$

$$u_{M4} = 0,05 \cdot \cos(57,968 \cdot T + 200)$$

In Figuur 2-2 zijn de waterstanden en stroomsnelheden afkomstig uit het SOBEK-RE-model voor de Rijn-Maasmonding vergeleken met waarden die zijn verkregen door bovengenoemde harmonische componenten op te tellen bij de getijgemiddelde waterstand of stroomsnelheid.



Figuur 2-2. Waterstanden en stroomsnelheden benaderd met harmonische getijcomponenten en vergeleken met waarden afkomstig uit het SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding (Waal).

Verondersteld wordt dat op het traject bij Gorinchem het sedimenttransport kan worden gemodelleerd met de transportformule van Engelund en Hansen, zodat het transport evenredig is met de stroomsnelheid tot de macht 5. Afgeleid kan worden voor de snelheden in Figuur 2-2 dat de transporten berekend met een variërende stroomsnelheid circa 6% hoger zijn dan wanneer deze worden uitgerekend met de gemiddelde stroomsnelheid. Voor dit traject zou de constante bedvormende afvoer in een getijloze berekening met circa 3,5% moeten worden verhoogd om het effect van getij op transport te introduceren. Echter, bij hogere rivierafvoeren wordt dit effect minder omdat de getij-invloed wordt teruggedrongen. Tabel 2-1 toont hoe de verschillen in transporten geleidelijk verdwijnen naarmate hogere afvoeren worden meegenomen in de analyse (dus wanneer als het ware de periode geleidelijk wordt verlengd naar een jaar). De getallen in de tabel zijn afgeleid voor het transport op km 948 voor de afvoerserie van 1999.

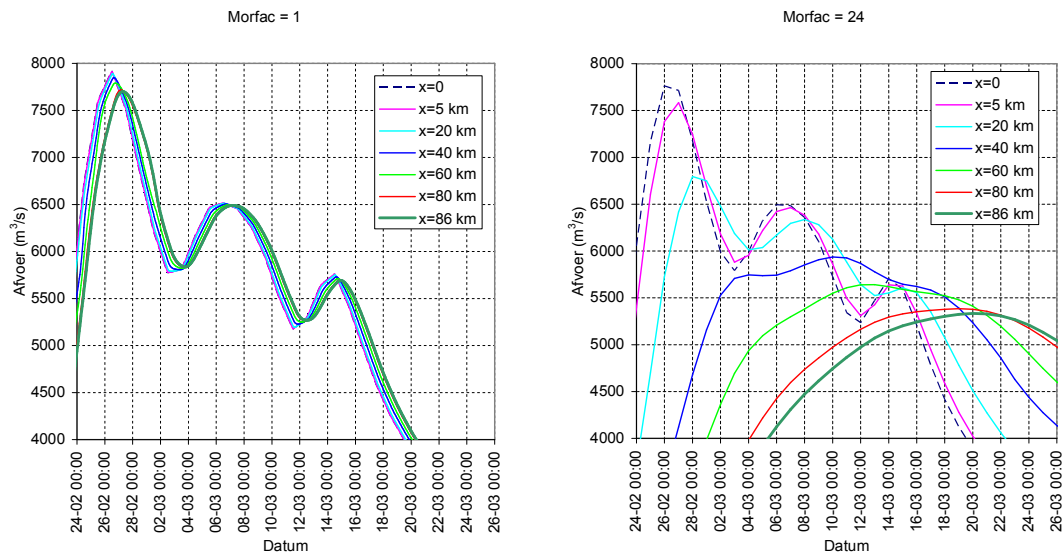
Tabel 2-1. Berekende verhouding in transporten berekend met en zonder getij voor km 948 in de Waal.

Hoogste in analyse meegenomen afvoer (m <sup>3</sup> /s)	Verhouding S(met getij)/S(zonder getij) (%)
1000	110,2
1200	105,7
1400	101,6
1600	100,8
1800	100,5
2000	100,4
3000	100,4
4000	100,0

Als alle in 1999 opgetreden afvoeren worden meegenomen (hoge en lage afvoeren), en dus het gemiddelde jaartransport wordt beschouwd, kan geen noemenswaardig effect meer worden geconstateerd van het wel of niet meenemen van de getij-invloed in de simulaties. De jaartransporten met en zonder getij zijn vrijwel gelijk. Dit geldt overigens niet voor de trajecten waar door getijbeweging de stroming van richting verandert.

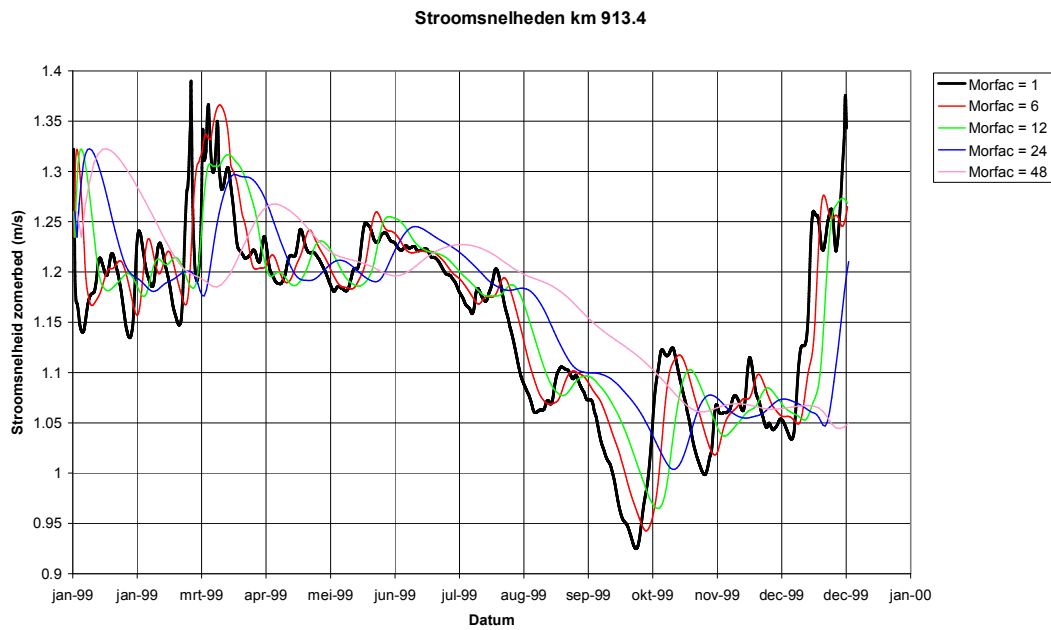
### Testen met een morfologische factor

Voor het testen van de invloed van de morfologische factor op de voortplanting van hoogwatergolven zijn simulaties uitgevoerd voor het jaar 1999 met het SOBEK-RE-model van de Rijntakken (Van Vuren en Sloff, 2006). Voor verschillende morfologische factoren zijn berekeningen uitgevoerd. In Paragraaf 2-3 is toegelicht dat de hoogwatergolf bij toepassing van een morfologische factor moet worden gecomprimeerd (ten opzichte van de morfologische tijd), waardoor het volume van de golf op de hydraulische tijdschaal afneemt. De berekening van de afvoergolf wordt vervolgens in de hydraulische tijd uitgevoerd, waarbij de voortplantingssnelheid onveranderd is, maar waarbij de piek van de golf door het kleinere volume sterker wordt gedempt. Wanneer het eindresultaat wordt teruggeschaald naar de morfologische tijd (en dus kan worden vergeleken met het resultaat van een zelfde som zonder morfologische factor), volgt dat de afvoergolf zich vertraagd en sterk gedempt door het systeem verplaatst.



Figuur 2-3. Met SOBEK-RE berekende afvoerverloop van hoogwaterperiode 1999 voor situaties met morfologische factoren van 1 en 24.

Figuur 2-3 toont de resultaten die zijn berekend voor een hoogwaterafvoer in 1999 op de Nederrijn en de Bovenrijn in het SOBEK-RE-model (Van Vuren en Sloff, 2006). Hieruit blijkt dat de afvoeren door de factor van 24 significant afnemen en dat de duur van de passage door het traject toeneemt van orde 1 dag tot circa 24 dagen (gelijk aan de toegepaste factor).



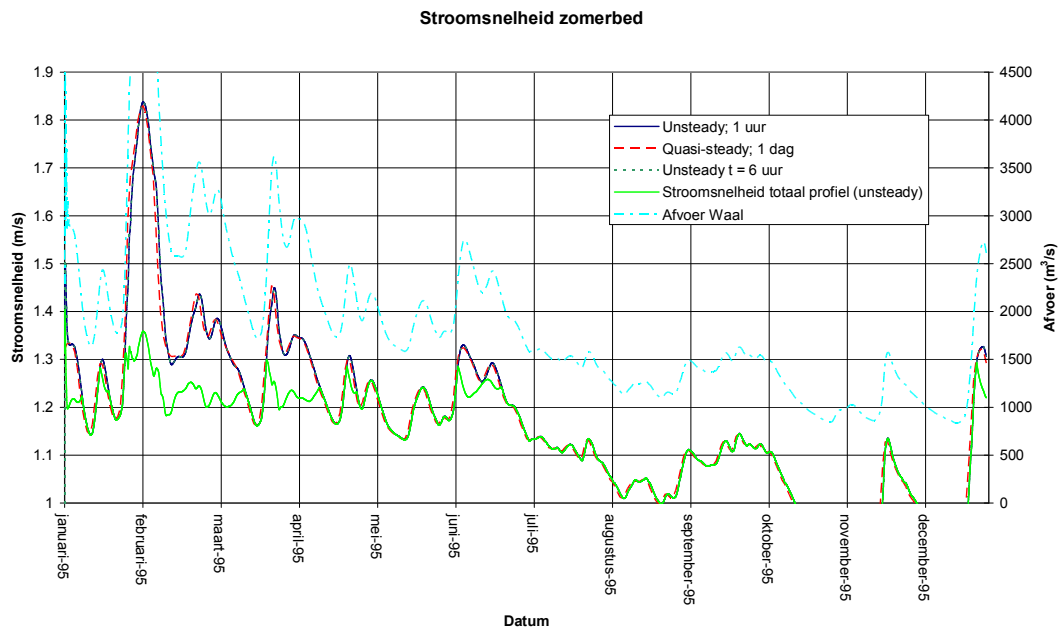
Figuur 2-4. Stroomsnelheid als functie van tijd op de Waal (km 913,4) voor verschillende morfologische factoren.

Figuur 2-4 toont hoe de berekende stroomsnelheid gedurende een jaar in de Waal wordt beïnvloed door gebruik van verschillende morfologische factoren. De desbetreffende locatie (km 913,44, coördinaat Waal\_1, 45719 in SOBEK-RE-model) is willekeurig gekozen, maar is representatief voor het desbetreffende traject. Voor een redelijke weergave van de variatie in maximale en minimale stroomsnelheden (en de daarmee samenhangende transporten) is een morfologische factor kleiner dan orde 12 aan te bevelen. Deze aanbeveling is vooral relevant wanneer morfologische processen ten gevolge van het afvoerregime worden beschouwd. Bij hogere waarden van de morfologische factor worden de pieksnelheden tijdens hoogwater te veel onderschat. Dit gevolg van de demping van afvoergolven is signifikanter naarmate het model langer is. Wanneer langjarige effecten worden beschouwd (bijvoorbeeld bodemdaling), is ook van belang dat het gemiddelde jaartransport gelijk blijft. Tabel 2-2 laat zien hoe voor deze simulaties het jaartransport geleidelijk toeneemt naarmate de morfologische factor toeneemt. Tot een factor 24 is het effect minder dan 3%, wat als een acceptabele marge kan worden beschouwd.

Tabel 2-2. Effect van morfologische factor op jaartransport berekend op km 913,44 in de Waal.

Morfologische factor (-)	Toename van jaartransport (%)
1	0,0
6	2,6
12	2,4
24	3,0
48	8,6
48 (zonder berging)	4,7

Uit de testen is ook gebleken dat voor het berekenen van de morfologische effecten gebruik moet worden gemaakt van de stroomsnelheid in het zomerbed en niet van de stroomsnelheid van het totale profiel. Tijdens hoogwatercondities verschillen deze snelheden significant van elkaar, zoals getoond in Figuur 2-5. De invloed van de tijdstap op de grootte van de snelheden in het zomerbed is echter gering. Daarnaast blijkt ook dat de toepassing van een quasi-stationaire (“quasi-steady”) aanpak in dit geval (zonder getij-involed) een redelijk goede overeenstemming oplevert met de volledig instationaire (“unsteady”) berekening.



Figuur 2-5. Stroomsnelheid in zomerbed en in het totale profiel, berekend met variërende afvoer (periode 1999) op km 894,34 in de Waal.

In Figuur 2-5 is de quasi-stationaire berekening uitgevoerd met een tijdstap van 1 dag en de instationaire berekening met tijdstappen van 1 uur en 6 uur. De rekentijdversnelling dankzij de quasi-stationaire berekening bedraagt ongeveer een factor 20 en is daarmee min of meer gelijk aan de versnelling die wordt bereikt door een morfologische factor van 24 toe te passen in een instationaire berekening. Het resulterende gedrag van de afvoervariaties wordt voor dit voorbeeld echter aanzienlijk beter gereproduceerd door een quasi-stationaire aanpak dan door een instationaire berekening met morfologische factor 24.

## 2.5 Zoutindringing

Voor de modelrand bij Hoek van Holland en de Nieuwe Waterweg stroomopwaarts daarvan speelt ook de zoutindringing een rol. Vooralsnog is hiermee in het 1D model geen rekening gehouden. Een 1D model is in principe niet geschikt om de gelaagdheid weer te geven die een essentieel aspect is van het zoute water dat zich in de vorm van een zouttong stroomopwaarts uitstrekt onder een laag van zoet rivierwater. De effecten van deze gelaagdheid op sedimenttransport zouden eventueel geparametriseerd in een 1D model kunnen worden meegenomen door middel van dispersiecoëfficiënten. Een goede weergave van details van de effecten van de zouttong op het zand- en slibtransport vergt echter een tweedimensionale (2DV) aanpak.

Vermeldenswaard is verder dat de zoutindringing ook van invloed is op de ruwheid in een 1D model. Zowel deze invloed als de tapse vorm van een estuarium leidt tot een stroomrichtingsafhankelijke ruwheid bij de kalibratie van de M4- en M0-componenten van het getij (de M2-component is te kalibreren met de gemiddelde ruwheid).



## 3 Modelbouw en kalibratie

### 3.1 Instrumentarium en basisgegevens

#### Gebruikte software

WL is in 2005 in samenwerking met RIZA begonnen aan een vernieuwingslag op het gebied van het 1D hydrodynamische en morfologische instrumentarium. Zo zijn veel functionaliteiten van het oude SOBEK-RE overgebracht in SOBEK-Rural, wat heeft geresulteerd in de opvolger van SOBEK-RE: SOBEK-Rivers. Deze versie combineert de voordelen van RE (profieltypen, kunstwerkformuleringen, sturingsregels) met die van Rural (veelzijdigheid, geavanceerde GIS-georiënteerde user-interface, koppelingen met andere modules). In deze studie wordt voor de waterbeweging gebruik gemaakt van SOBEK-Rivers.

Aan de implementatie van morfologie in Rivers, belangrijk pluspunt van RE, wordt op dit moment nog hard gewerkt. Eind 2006 is met RIZA besloten om een ontwikkeltraject te starten waarin het sedimenttransport wordt geoperationaliseerd in DELWAQ, de waterkwaliteitsmodule van SOBEK (Sloff et al, 2007). Naar verwachting zal de nieuwe morfologische module eind 2007 operationeel zijn. Tot het zover is, zal gebruik moeten worden gemaakt van een experimentele versie van het morfologische rekenhart, genaamd 'morpho.exe'. Deze module is gebaseerd op de code van SOBEK-RE, en is zodanig ontworpen dat het parallel kan worden gedraaid met het hydrodynamische rekenhart van SOBEK-Rivers ("sobeksim.exe"). Het is door WL in de periode 2004-2007 ontwikkeld, en is in dit project gebruikt. Het arsenaal van reeds beschikbare sedimenttransportformules (Engelund & Hansen en Meyer-Peter & Müller) is in dit project uitgebreid met de nieuwe sedimenttransportformule van Van Rijn, versie 2006.

De berekeningen zijn uitgevoerd met SOBEK-Rivers versie 2.11.000.12, aangevuld met sobeksim.exe van 28 februari 2007 en morpho.exe van 14 maart 2007.

#### Gebruikte hydrodynamische modellen

Er zijn inmiddels diverse 1D schematisaties beschikbaar van zowel het Rijn-Maasmondinggebied als de Rijntakken. Zonder uitzondering zijn deze modellen ontwikkeld in SOBEK-RE. Het is mogelijk om RE-modellen te converteren naar SOBEK-Rivers. Dit is echter geen gemakkelijke zaak. Met name bij complexe kunstwerken, zoals de Haringvlietsluizen of de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg, kunnen problemen optreden. Er is daarom bij de aanvang van dit project gekozen om gebruik te maken van een schematisatie van de Rijn-Maasmonding die in 2005 in het kader van project Deltabreed door WL is geconverteerd van RE naar Rivers. In een laat stadium is wel gebleken dat toentertijd een naar verhouding oude versie van het Rijn-Maasmonding model is gebruikt voor de conversie.

Daarom is besloten om de schematisatie van de belangrijkste takken uit dit gebied, de drie Merwedes en de Beneden-Waal, te vervangen door overeenkomstige takken uit een nieuwe RE-schematisatie, zie Paragraaf 3.2.1. De schematisatie van de Midden- en Boven-Waal is gebaseerd op een nieuwe versie van het Rijntakkenmodel (Sloff, 2006).

## **Gebruikte morfologische modellen**

Voor de Midden- en Boven-Waal is gebruik gemaakt van het gegradeerd-sedimentmodel van Sloff (2006). Voor de Rijn-Maasmonding is gebruik gemaakt van het gegradeerd-sedimentmodel van Sloff en Verschelling (2006), gebaseerd op het uniform-sedimentmodel van Mol (2003).

## **Morfologische gegevens**

Slechts weinig is bekend over het verloop van de korreldiameters in de verschillende riviertakken van de Rijn-Maasmonding, met name voor korreldiameters kleiner dan 63  $\mu\text{m}$ . Fugro (2002) heeft een grootschalig bodemmonsteronderzoek uitgevoerd. Daarnaast heeft Medusa in de periode 1999-2002 voor enkele takken het zand-slibgehalte van de top laag bepaald op basis van radiometrische metingen.

Voor de gehele periode van 1990 tot 2000 zijn in principe voor alle riviertakken jaarlijkse dwarspeilingen van het zomerbed beschikbaar. In deze studie is gebruik gemaakt van de ruimtelijk gedistribueerde bodemliggingen in 1990 en 2000, van de gehele Waal en de Merwedes.

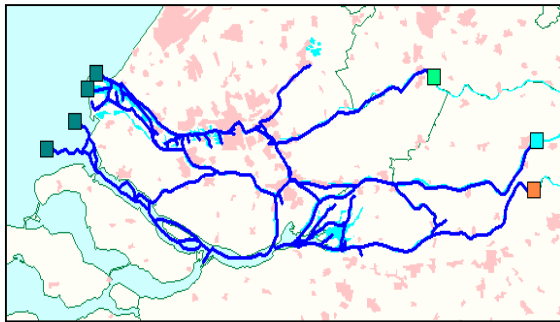
Voor de baggergegevens en jaarlijkse sedimenttransporten is gebruik gemaakt van twee balansstudies, één van de Rijntakken (Ten Brinke et al, 2001) en één van de Rijn-Maasmonding over de periode 1990-2000 (Snippen et al, 2005). Daarnaast zijn door de opdrachtgever aanvullende baggergegevens voor de Waal en de Merwedes beschikbaar gesteld. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de onzekerheid in deze gegevens bijzonder groot is. Zandwinners vermoeden dat de werkelijke baggerhoeveelheden in het verleden wel tweemaal zo groot zijn als in de gegevensbestanden is opgenomen (Mosselman & Wijbenga, 2007).

## **3.2 Modelbouw**

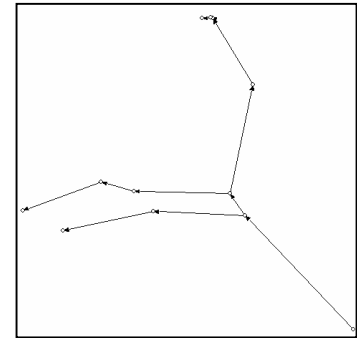
### **3.2.1 Hydrodynamisch model**

Het modelinstrumentarium van dit project is nog volop in ontwikkeling. Zowel het hydrodynamische als het morfologische rekenhart is diverse malen aangepast om de verschillende simulaties te kunnen draaien. Dit ontwikkelkarakter blijkt ook uit Figuren 3-1 tot en met 3-2. Uitgangspunt was het recentelijk aangepaste en geteste 1D model van de Rijn-Maasmonding op basis van SOBEK-Rivers (Sloff en Verschelling, 2006). Figuur 3-1 geeft hiervan de schematisatie.

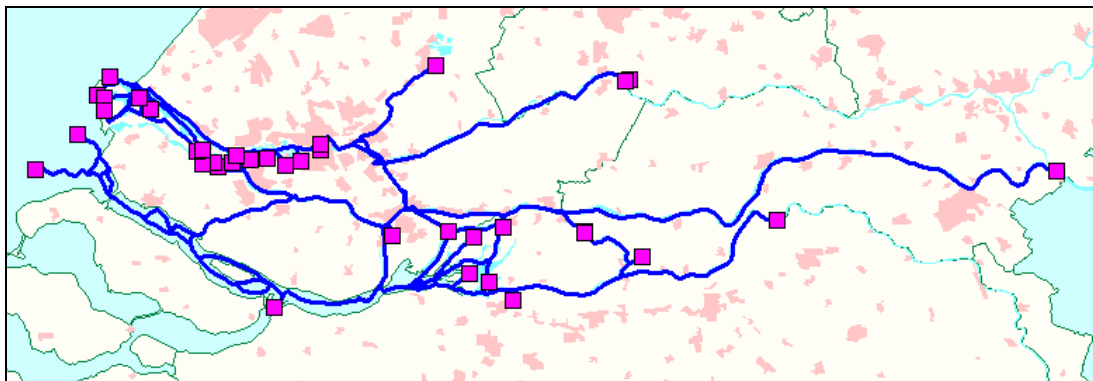
Dit model, beginnend bij Tiel, is uitgebreid met een model van de Boven- en Midden-Waal dat afkomstig is uit het RE-model van de Rijntakken (Figuur 3-2). Figuur 3-3 toont het aanvankelijke resultaat, dat in het vervolg wordt aangeduid als Model 1.



Figuur 3-1. Rijn-Maasmondingmodel in SOBEK-Rivers.



Figuur 3-2. Rijntakkenmodel in SOBEK-RE.



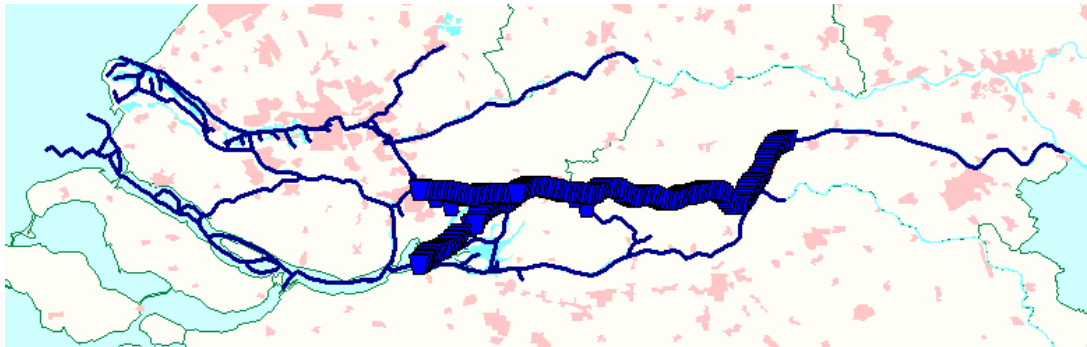
Figuur 3-3. Model 1 - Gecombineerd model in SOBEK-Rivers van Rijn-Maasmonding en Waal.

De nieuwe takken van dit model, de Boven- en Midden-Waal, zijn vervolgens aan een uitgebreide modeltest onderworpen. De takken van het Rijn-Maasmondingmodel, inclusief de Beneden-Waal, zijn niet nogmaals geanalyseerd aangezien deze stap reeds was uitgevoerd door Sloff & Verschelling (2006). Bij de modeltest zijn de waterstanden, stroomsnelheden en afvoeren op verschillende locaties op de Waal vergeleken met die van het oorspronkelijke RE-model van de Rijntakken. Het hoogwater van 1994-95 is als test gebruikt. Na enkele correcties kwamen de resultaten zeer goed overeen<sup>1</sup>. Figuren van de vergelijkingen zijn terug te vinden in Bijlage A. De morfologische kalibratie voor de periode 1990-2000 is op basis van dit hydrodynamische model uitgevoerd (zie Paragraaf 3.3).

Na afloop van de kalibratie is aan het licht gekomen dat aan het gebruikte Rivers-model van de Rijn-Maasmonding een verouderde versie van het RE-model ten grondslag lag. Om deze reden is geëxperimenteerd met een nieuwe versie van het model van de Merwedede en de Beneden-Waal, afkomstig uit het RE-model dat gebruikt is voor MHW-berekeningen in het kader van de bepaling van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006).

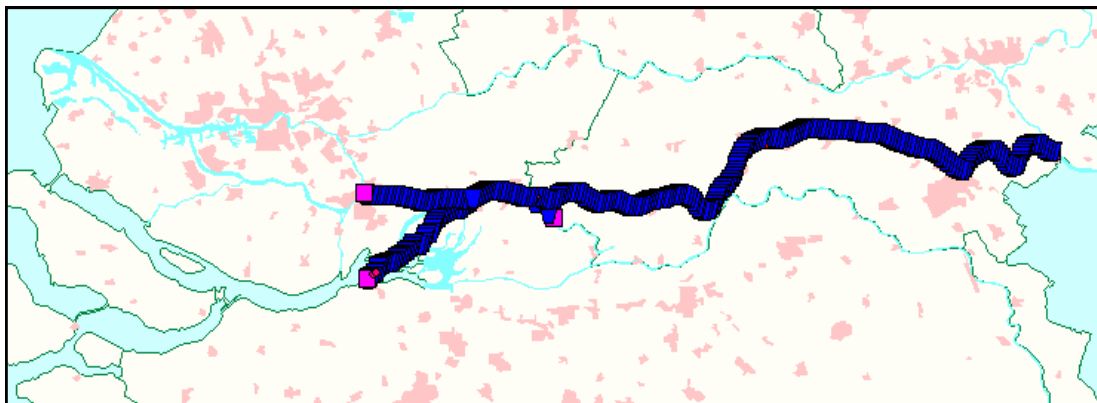
<sup>1</sup> Gezien de inherente verschillen in numerieke afhandeling tussen SOBEK-RE en SOBEK-Rivers is het vrij uitzonderlijk dat de resultaten exact gelijk zijn. Dit is eigenlijk alleen mogelijk op takken zonder kunstwerken, zoals op de Waal het geval is.

Na isolatie van deze takken uit het basismodel (HR2006), zijn ze geconverteerd van SOBEK-RE naar SOBEK-Rivers en gecombineerd met het bestaande Model *I*. Dit resulteerde in Model *II* (Figuur 3-4).



Figuur 3-4. Model *II* – Verbeterd hydrodynamisch model Pannerdensch Kop – Hoek van Holland.

Vervolgens bleek het morfologische rekenhart niet stabiel genoeg te zijn om daarmee periodes langer dan 10 jaar ten behoeve van scenariostudies te kunnen doorrekenen. Daarom is Model *II* aan de benedenstroomse zijde ingekort: alle takken benedenstrooms van de Beneden en Nieuwe Merwede zijn verwijderd. Dit heeft Model *III* opgeleverd (Figuur 3-5). Tabel 3-1 geeft een overzicht van de verschillende modellen.



Figuur 3-5 Model *III* – Hydrodynamisch model Pannerdensch Kop - Merwedens.

Tabel 3-1. Overzicht van ontwikkelde hydrodynamische schematisaties.

Model	Boven- en Midden-Waal	Rijn-Maasmonding	Toepassing
<i>I</i>	RE-model van Sloff (2006)	Rivers-model van Sloff & Verschelling (2006)	Morfologische kalibratie
<i>II</i>	Als <i>I</i>	Als <i>I</i> , met Merwedens en Beneden-Waal uit HR2006	Testberekeningen
<i>III</i>	Als <i>I</i>	Als <i>II</i> , zonder takken benedenstrooms van de Merwedens	Scenario's

Model *III* is getest door de in een kleine test berekende waterstanden, afvoeren en stroomsnelheden te vergelijken met de resultaten van Model *II*. Voor de testberekening zijn op de benedenranden van Model *III* waterstandstijdreeksen opgelegd, die berekend zijn met behulp van Model *II*. Voor grafieken van de vergelijkingen wordt verwezen naar Bijlage B. Gemiddelde waarden van de afvoeren en stroomsnelheden komen goed overeen. Het is wel opvallend dat de fluctuaties om het gemiddelde van met name de stroomsnelheden groter waren in het volledige model dan in het kleine model. Dit is een gevolg van de nabijheid van de benedenranden. Mede als gevolg hiervan moet geconcludeerd worden dat de vereenvoudiging van het hydrodynamische model heeft geresulteerd in niet te verwaarlozen afwijkingen in de resultaten. Er dient daarom voorzichtig te worden omgegaan met Model *III*.

### 3.2.2 Morfologisch model

Het morfologische model is samengesteld uit de modellen van de Rijn-Maasmonding (Sloff & Verschelling, 2006) en de Rijntakken (Sloff, 2006). In eerste instantie zijn de instellingen van de verschillende morfologische parameters overgenomen uit de basismodellen, tenzij deze van elkaar afweken. In dat geval is voorkeur gegeven aan de instellingen volgens het Rijn-Maasmondingmodel. Met dit model is een initiële run uitgevoerd om het model te controleren op stabiliteit. In eerste instantie bleek het niet mogelijk te zijn om het model voor de gehele kalibratieperiode (1990-2000) te draaien. Dit bleek te worden veroorzaakt door een kleine fout in de implementatie van de transportformule van Van Rijn in het morfologische rekenhart. Nadat dit was gecorrigeerd, draaide het model stabiel gedurende deze periode. Zoals reeds vermeld in Paragraaf 3.2.1, bleek het vervolgens echter niet mogelijk om dit model in te zetten bij de scenario-berekeningen, en is het daarom in ruimtelijke zin ingekort (Model *III* uit Tabel 3-1). Hierbij is aan het morfologische model van de overgebleven takken niets veranderd.

De volgende alinea's beschrijven de gekozen instellingen en waarden van de verschillende onderdelen van het complete morfologische model<sup>2</sup> van de Pannerdensch Kop tot aan Hoek van Holland.

#### Sedimentfracties

Het Rijn-Maasmondingmodel hanteert 8 sedimentfracties en de gegradeerd-sedimentversie van het Rijntakkenmodel 17 fracties. Tabel 3-2 en 3-3 geven hiervan een nadere specificatie.

---

<sup>2</sup> Het morfologische model wordt op dit moment gedefinieerd in de vorm van één ASCII-bestand met vaste naam ('morp.txt') en structuur. Flokstra & Crebas (2004) geven nadere informatie over de structuur van dit bestand.

Tabel 3-2. Sedimentfracties in het Rijn-Maasmondingmodel.

Nummer	Ondergrens korreldiameter (mm)	Bovengrens korreldiameter (mm)	Naam
1	0,001	0,008	lutum
2	0,008	0,0224	fijn silt
3	0,0224	0,063	silt
4	0,063	0,1775	fijn zand
5	0,1775	0,5	middel zand
6	0,5	2,0	grof zand
7	2,0	8,0	fijn grind
8	8,0	-	grind

Tabel 3-3. Sedimentfracties in het Rijntakkenmodel.

Nummer	Ondergrens korreldiameter (mm)	Bovengrens korreldiameter (mm)
1	0,001	0,063
2	0,063	0,09
3	0,09	0,125
4	0,125	0,18
5	0,18	0,25
6	0,25	0,355
7	0,355	0,5
8	0,5	1
9	1	2
10	2	2,8
11	2,8	4
12	4	8
13	8	16
14	16	32
15	32	64
16	64	128
17	128	256

Om recht te doen aan de grote spreiding van korrelgroottes in de bedding op het traject Pannerdensche Kop – Hoek van Holland is het noodzakelijk om het aantal fracties uit te breiden ten opzichte van het morfologische model van de Rijn-Maasmonding. Tegelijkertijd is het niet noodzakelijk om alle grove fracties van het Rijntakkenmodel op te nemen, aangezien op de Waal geen fracties grover dan 16 mm voorkomen. De fractieverdelingen van beide modellen zijn daarom gecombineerd tot de 14 sedimentfracties die in Tabel 3-4 zijn weergegeven. Gedurende het kalibratieproces is overigens gebleken dat de rekentijden behoorlijk oplopen. Dit kan een reden zijn om in de toekomst het aantal fracties eventueel te beperken.

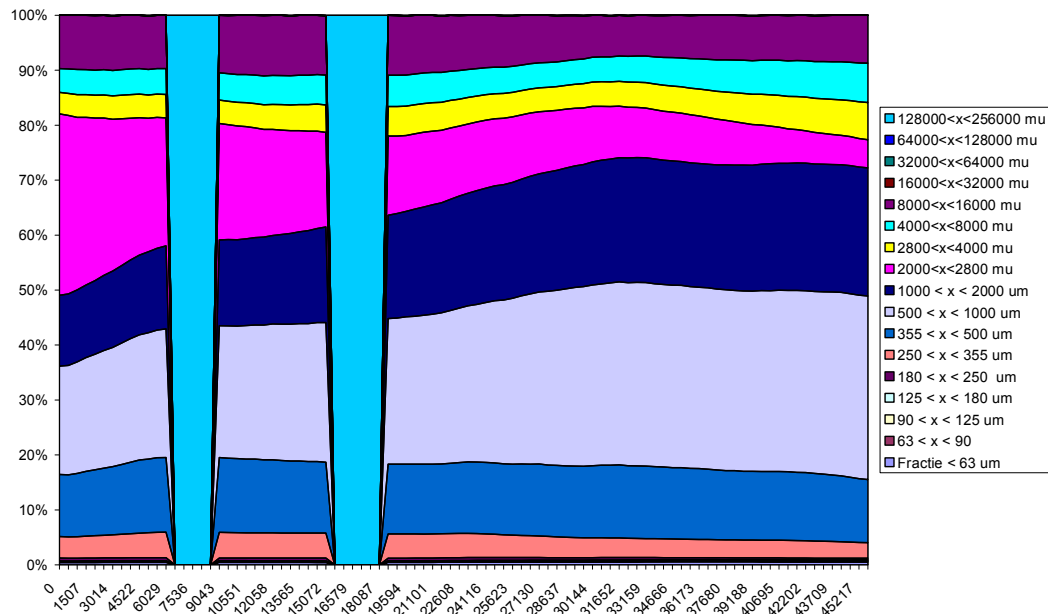
Tabel 3-4. Sedimentfracties in het model Pannerdensch Kop – Hoek van Holland.

Nummer	Ondergrens korreldiameter (mm)	Bovengrens korreldiameter (mm)
1	0,001	0,008
2	0,008	0,0224
3	0,0224	0,063
4	0,063	0,18
5	0,18	0,25
6	0,25	0,5
7	0,5	1
8	1	2
9	2	4
10	4	5,6
11	5,6	8
12	8	11,2
13	11,2	16
14	16	6250

### Initiële bodemsamenstelling

De initiële bodemsamenstelling van de riviertakken van het Rijn-Maasmondingmodel (tot aan Tiel) is gebaseerd op een in 2002 uitgevoerde meetcampagne (Fugro, 2002), waarbij men in het gebied een groot aantal bodemmonsters heeft genomen en fractieverdelingen heeft bepaald op basis van laboratoriumonderzoek. De fijnste fractie uit de zeefkromme (0-63  $\mu\text{m}$ ) is verder onderverdeeld op basis van kengetallen uit het onderzoek van Van Ledden (2003). Deze gegevens zijn als basis gebruikt voor de definitie van de initiële bodemsamenstelling in deze studie, aangevuld met additionele gegevens uit de meetcampagne van Fugro met betrekking tot de aan de fracties van het Rijn-Maasmondingmodel toegevoegde grove fracties.

Figuur 3-6 toont de initiële bodemsamenstelling van de Waal voor het traject Pannerdensch Kop – Tiel, zoals die was gedefinieerd in het Rijntakkenmodel. De vaste laag bij Nijmegen en de als vaste laag benaderde bodemkribben bij Erlecom zijn gemodelleerd door de frequentie van voorkomen van de grofste fractie op 1 te zetten. Deze gegevens zijn overgenomen in het gecombineerde model, gecorrigeerd voor de nieuwe fractiegrenzen.



Figuur 3-6. Initiële bodemsamenstelling Waal vanaf Pannerdensche Kop tot Tiel.

## Sedimenttransportformule

Conform de opdracht is gebruik gemaakt van de nieuwe sedimenttransportformules van Van Rijn, die in het kader van deze opdracht in SOBEK zijn ingebouwd. De correctiefactor voor de kritieke bodemschuifspanning is op 0.9 gezet, waardoor op grovere trajecten ook bij gemiddelde afvoeren nog voldoende sediment wordt getransporteerd. De kalibratiefactor is in eerste instantie voor alle takken op 1 gezet.

## Menglaag en onderlagen

Er is gebruik gemaakt van een menglaag met een constante dikte van 0,5 m. Deze aanpak is gelijk aan die van het Rijn-Maasmondingmodel, maar wijkt af van de structuur in het Rijntakkenmodel, waar gebruik is gemaakt van een variabele laagdikte die afhankelijk is van de afvoer.

## Baggerwerk

Voor de Waal zijn de baggergegevens voor de periode 1990-2000 overgenomen uit het Rijntakkenmodel met gegradeerd sediment, gecorrigeerd voor de gewijzigde fractiegrenzen. Voor de overige takken is gebruik gemaakt van de baggergegevens zoals die door Mol (2003) voor de Rijn-Maasmonding zijn verzameld. Ter controle zijn de baggerhoeveelheden (in m<sup>3</sup>/jaar) voor de Merwedens vergeleken met de hoeveelheden per riviertak volgens Snippen et al (2005). Ze bleken exact overeen te komen.



## Morfologische factor

Voor het versnellen van de berekeningen is gebruik gemaakt van een morfologische factor. In het model worden de berekende sedimenttransporten met deze factor vermenigvuldigd. De waterbeweging op de getijranden wordt onveranderd gehandhaafd, maar de afvoerhydrograaf op de instroomranden wordt evenredig met de morfologische factor in de tijd gecomprimeerd. Om stabiliteitsproblemen te voorkomen is de morfologische factor beperkt tot een waarde van 6. Hierbij is de volgende periode doorgerekend:

- Starttijd 1 december 1989, 00:00:00 uur;
- Eindtijd 6 oktober 1991, 20:00:00 uur.

Deze 22 maanden komen overeen met  $22 \times 6 = 132$  maanden morfologische tijd, ofwel het tijdsinterval van 1 december 1989 tot 1 januari 2001.

## Morfologische randvoorwaarden

De bovengrenzen van de Lek, de Waal en de Maas liggen in het model bij respectievelijk Hagestein, de Pannerdensche Kop en Lith. Bij Hagestein en Lith is de lokale fractieverdeling van de bodem opgelegd. Bij de Pannerdensche Kop is een constante bodemdaling opgelegd van 1,5 cm/jaar (afgeleid uit jaarlijkse dwarspeilingen).

### 3.3 Beperkte kalibratie op grootschalige ontwikkeling van de bodem

In navolging van Mol (2003) is ervoor gekozen om periode 1990-2000 als kalibratieperiode te gebruiken. Deze beslissing is voornamelijk ingegeven door de beschikbaarheid van gegevens. Verder terug in de tijd neemt vooral de onzekerheid in de baggergegevens steeds meer toe. Verder zijn er voor dit decennium twee morfologische balansstudies voorhanden (Ten Brinke et al, 2001; Snippen et al, 2005), die het vergelijken van modelresultaten met metingen vergemakkelijken.

De kalibratie is uitgevoerd met behulp van het complete model van de Pannerdensche Kop tot Hoek van Holland (Model II uit Tabel 3-1).

De globale afregeling van het morfologische model is in enkele stappen uitgevoerd, waarbij telkens het effect van het aanpassen van één kalibratieparameter op de resultaten is onderzocht. Hierbij is uitsluitend gekeken naar jaarlijkse bodemveranderingen, zowel takgemiddeld als profielgemiddeld, en jaarlijkse profielgemiddelde sedimenttransporten. Als kalibratiegrootheden zijn de kalibratiefactor in de sedimenttransportformule van Van Rijn en de coëfficiënten in de splitsingspuntrelatie van de Merwedegehanteerd. Daarnaast is geëxperimenteerd met de dikte van de transportlaag (1,0 m in plaats van 0,5 m) en variatie van de bovenstroomse morfologische randvoorwaarde (3,0 cm daling per jaar in plaats van 1,5 cm daling).

Deze berekeningen zorgden echter voor weinig verschil en worden daarom niet verder hier beschreven.

- *Kalibratiefactor in de sedimenttransportformule van Van Rijn.* Deze factor vergroot of verkleint het sedimenttransport evenredig met de factor en beïnvloedt hiermee de snelheid van de morfologische processen en bodemveranderingen. Standaard staat hij voor alle takken op 1.
- *Exponenten in splitsingspuntrelaties.* De splitsingspuntrelatie beïnvloedt de verdeling van sediment over de benedenstroomse takken. In het basismodel is voor alle splitsingspunten gebruik gemaakt van een machtsrelatie waarbij de sedimentverdeling afhangt van zowel de afvoerverhouding als de verhouding van sedimenttransporterende breedtes:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^m$$

waarin:

$S_n$  = sedimenttransport in tak  $n$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_n$  = debiet in tak  $n$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$B_n$  = Breedte in tak  $n$  (m)

Standaard zijn de exponenten gedefinieerd als  $k = 2$  en  $m = -1$ .

De resultaten van de kalibratie worden gepresenteerd in Bijlagen C, D en E. Bijlage C geeft een overzicht van alle berekeningen, Bijlage D presenteert de vergelijking van bodemveranderingen en Bijlage E de vergelijking van sedimenttransporten.

De kalibratie heeft het volgende opgeleverd:

- Uit de resultaten van de testsommen bleek dat het voor de kalibratieperiode berekende sedimenttransport (in  $\text{m}^3/\text{jaar}$ ) op de Waal en de Merwedese aan de lage kant was. Tegelijkertijd was de gemiddelde jaarlijkse bodemdaling op al deze takken, met uitzondering van de Nieuwe Merwede, te klein in vergelijking met de metingen. Daarom is de kalibratiefactor voor het gehele systeem verhoogd van 1 naar  $4/3$ . Hierdoor neemt het sedimenttransport zodanig toe dat het verschil met de waarden volgens Snippen et al (2005) en Ten Brinke et al (2001) structureel is afgenomen. Tegelijkertijd neemt de takgemiddelde jaarlijkse bodemdaling op de Boven- en Midden-Waal toe van  $1,6 \text{ cm/jaar}$  naar  $2,1 \text{ cm/jaar}$ , tegen een gemeten waarde van  $2,0 \text{ cm/jaar}$ . De prijs voor deze verbeteringen wordt betaald op de Merwedese. Daar nemen de toch al te kleine bodemdalingen verder af. In de uiteindelijke aanpassing van de kalibratiefactor is gezocht naar een balans tussen de tegengestelde effecten op sedimenttransport en bodemverandering (berekening 6 in Bijlage C).

- Tijdens de kalibratie is geëxperimenteerd met andere instellingen van de exponenten van de splitsingspuntrelatie voor de Kop van de Oude Wiel (Merwedespplitsing) met het doel om de onderschatting van de bodemdaling van de Beneden Merwede en de overschatting van de bodemdaling van de Nieuwe Merwede te corrigeren. Dit heeft uiteindelijk niet geleid tot het gewenste effect. Mede als gevolg van de relatief korte simulatieperiode (10 jaar), bleven de effecten beperkt tot de eerste twee kilometers van de Beneden en Nieuwe Merwede (berekening 14 in Bijlage C).



## 4 Morfologische berekeningen

### 4.1 Beheerscenario's

#### 4.1.1 Introductie

WL en HKV hebben in 2006 een studie uitgevoerd naar de morfologische effecten van zandwinning op de Boven Merwede (Mosselman & Wijnbenga, 2007). Zij hanteerden daarbij verschillende beheerscenario's op basis van vermindering van zandwinning in de toekomst. Daarbij werd een sterk vereenvoudigd SOBEK-model van het traject Pannerdensch Kop – Werkendam gebruikt, omdat het complete model van de Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland nog niet operationeel was. Hier worden nu berekeningen van de desbetreffende scenario's herhaald met het uitgebreide model.

Doelstelling is het in kaart brengen van de effecten van het tot 2005 gevoerde zandwinbeleid op de morfologie van de Merwedede en de Waal, de waterstanden op deze rivieren en de afvoerverdeling over de Merwedede. De aandacht gaat vooral uit naar eventuele beperkingen in vaardieptes verder bovenstrooms op de Waal, ter plaatse van de vaste laag bij Sint Andries.

#### 4.1.2 Modelbouw

In eerste instantie is getracht om de simulaties uit te voeren met behulp van Model II. Dit is echter niet gelukt vanwege een scala aan problemen met het morfologische rekenhart die niet op korte termijn konden worden opgelost. De simulaties liepen keer op keer vast, veelal zonder duidelijke foutmeldingen. De belangrijkste problemen zijn de volgende:

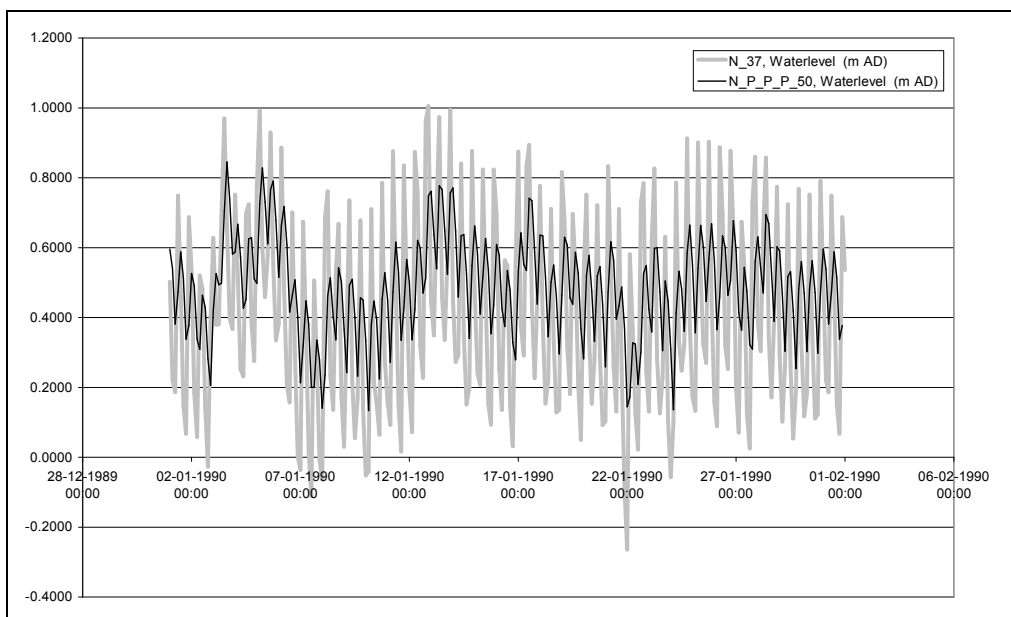
- *Rekentijd*: De rekentijd met Model II bedraagt naar schatting orde 7 etmalen voor een simulatieperiode van 110 jaar. Alle gedraaide sommen liepen echter voortijdig vast. De lange rekestijden en de tijd die nodig was om daarvan de oorzaken te analyseren hebben het project ernstig vertraagd;
- *Getijdenwerking in vertakt riviersysteem*: Veel stabiliteitsproblemen waren terug te voeren op splitsingspunten met omkerende stroomrichting als gevolg van de werking van het getij. Een voorbeeld is het punt waar de Nieuwe Merwede en de Amer samenkomen in het Hollandsch Diep. Omkering van de stroming op de Amer tijdens vloed veroorzaakte in enkele gevallen een instabiliteit die het model deed vastlopen;
- *Grote bodemsprongen*: de aangeleverde gekalibreerde modellen in SOBEK-RE van zowel de Rijntakken als de Rijn-Maasmonding bevatten soms grote sprongen tussen aangrenzende profielen. Dit is voor het hydraulische rekenhart in principe geen probleem, maar voor het morfologische rekenhart wel. Met name de bodemsprongen op de Bergsche Maas en de Amer waren problematisch. In sommige gevallen waren aanpassingen aan de bodemligging noodzakelijk;

- *Omvangrijk baggerwerk*: Extreem grote onttrekkingen van sediment als gevolg van opgelegd baggerwerk veroorzaakten soms dermate snelle bodemdalingen dat de berekeningen instabiel werden;
- *Omkerende stroomrichting in kunstwerken*: Problemen ontstonden ook door omkering van de stroomrichting ter plaatse van de Haringvlietsluizen en de stormvloedkering in de Nieuwe Waterweg.

Uiteindelijk is een voorlopige oplossing gevonden in het drastisch inkorten van Model II. Alle takken benedenstrooms van de Beneden en de Nieuwe Merwede zijn verwijderd. Dit heeft geresulteerd in Model III. Omdat vooral de effecten op de Merwedes en de Waal van belang zijn, is deze inkorting voor de zandwinstscenario's acceptabel. Ten opzichte van het sterk vereenvoudigde model van Mosselman & Wijbenga (2007) biedt Model II wel het voordeel dat het gebaseerd is op een gekalibreerd model, compleet met ingemeten profielen en ruimtelijk gedifferentieerde wrijvingsdefinities. Tevens loopt Model II verder stroomafwaarts door, want de Beneden en de Nieuwe Merwede maakten geen deel uit van het vereenvoudigde model.

Bij de uitvoering van de berekeningen zijn grotendeels dezelfde uitgangspunten gehanteerd als in de studie van Mosselman & Wijbenga (2007):

- *Simulatieperiode*: 1990 – 2100;
- *Afvoer op bovenrand bij Pannerdensche Kop*: 1600 m<sup>3</sup>/s stationair. Er wordt dus vanuit gegaan dat de karakteristieke afvoer niet verandert als gevolg van klimaatverandering. Het effect van klimaatverandering wordt onderzocht in Paragraaf 4.2;
- *Waterstandstijdreeksen op benedenranden*: cyclisch, periode 30 dagen, berekend met behulp van het complete model (Model II). Deze zijn weergegeven in Figuur 4-1, met een grijze lijn voor het waterstandsverloop aan de benedenrand van de Beneden Merwede bij Dordrecht en een zwarte lijn voor het waterstandsverloop aan het einde van de Nieuwe Merwede.



Figuur 4-1. Benedenstroomse waterstandsranden model III.

- Om de effecten van het zandwinbeleid in kaart te brengen, zijn twee berekeningen uitgevoerd: bij Berekening 1 wordt de winning tot 2100 gecontinueerd (tot 2100), terwijl de winning op de Boven Merwede bij Berekening 2 in 2008 wordt stopgezet. Aangenomen wordt dat het baggerwerk op de Beneden en de Nieuwe Merwede in beide gevallen gewoon wordt gecontinueerd. Op de Waal geldt sinds 1996 een baggerverbod in verband met de voortschrijdende bodemdaling.

Ten behoeve van het doorrekenen van het beheerscenario zijn door de opdrachtgever nieuwe baggergegevens aangeleverd voor de Merwedens en de Waal. Een vergelijking van deze nieuwe gegevens met de tot dan toe gebruikte gegevens leverde behoorlijke verschillen op:

- Op de Waal is het baggerwerk eind 1996 gestopt. In het model liep dit door tot 2000;
- Op de Waal was het jaarlijkse baggerwerk over de periode 1990-1996 met een factor 2 overschat: volgens de nieuwe data is er toen ongeveer 244,000 m<sup>3</sup>/jaar gebaggerd in plaats van 500,000 m<sup>3</sup>/jaar.

De in het model ingevoerde waarden zijn weergegeven in Tabel 4-1.

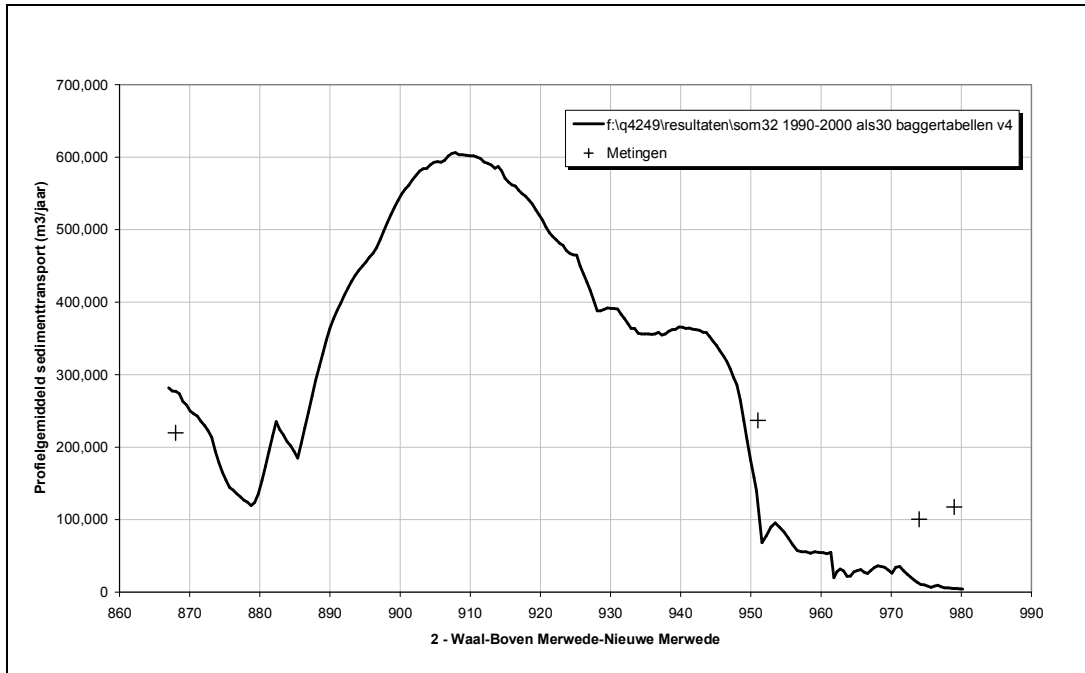
Tabel 4-1. Sedimentonttrekking op Merwedens en Waal over de periode 1990-2100.

Riviertak	Onttrekking van sediment (m <sup>3</sup> /jaar)			
	1990-1996	1997-2000	2000-2007	2008-2100
Boven- en Midden-Waal	186 225	0	0	0
Beneden Waal	57 721	0	0	0
Boven Merwede	276 192	240 912	240 912	0 of 240 912
Nieuwe Merwede	62 544	119 107	132 179	132 179
Beneden Merwede	47 029	34 079	42 860	42 860

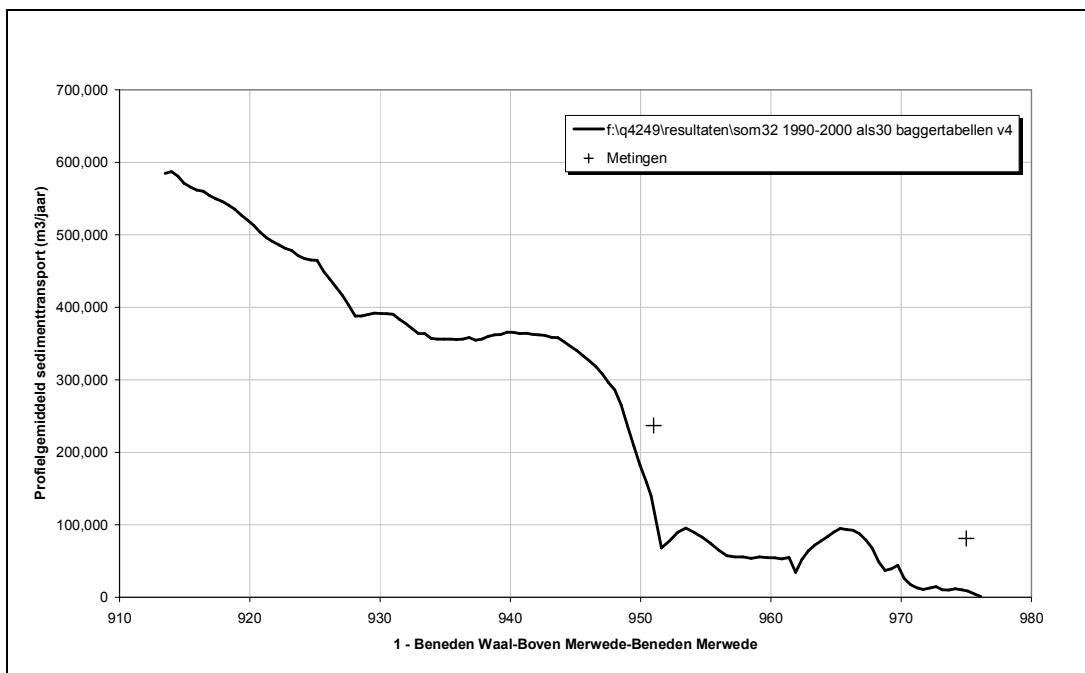
Omdat de nieuwe baggergegevens voor de kalibratieperiode andere resultaten geven, is een beperkte herkalibratie uitgevoerd. Als resultaat hiervan is de kalibratiefactor in de sedimenttransportformule van Van Rijn verhoogd van 4/3 naar 2. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4-2, Figuur 4-2 en Figuur 4-3. De resultaten komen op alle takken goed overeen met de metingen, met uitzondering van de resultaten op de Beneden Waal, waar nu netto sedimentatie optreedt terwijl de bodem daar volgens de lodingen is gedaald. Dit effect komt nog prominenter naar voren in de resultaten over de gehele periode 1990-2100 en wordt verder onderzocht in Paragraaf 4.1.3.

Tabel 4-2. Trajectgemiddelde jaargemiddelde bodemverandering over 1990-2000 met model III inclusief verbeterde baggergegevens.

Riviertak	Bodemverandering (mm/jaar)	
	Metingen	Berekening
Boven- en Midden-Waal	-20	-27
Beneden Waal	-10	+27
Boven Merwede	-38	-14
Nieuwe Merwede	-16	-11
Beneden Merwede	-2	-6



Figuur 4-2. Profielgemiddeld jaargemiddeld sedimenttransport over 1990-2000 met Model III inclusief verbeterde baggergegevens voor het traject Waal – Nieuwe Merwede.



Figuur 4-3. Profielgemiddeld jaargemiddeld sedimenttransport over 1990-2000 met Model III inclusief verbeterde baggergegevens voor het traject Beneden Waal (vanaf Tiel) – Beneden Merwede.

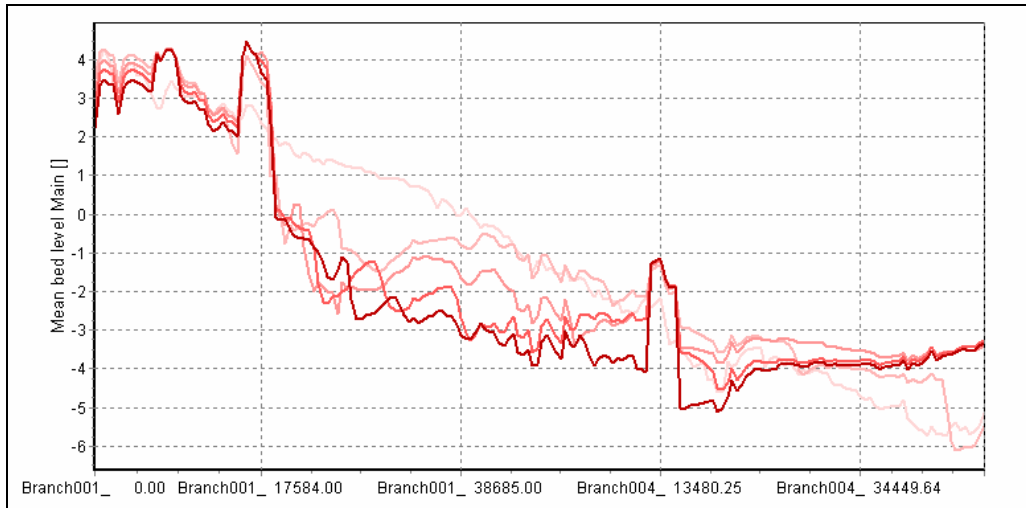
### 4.1.3 Resultaten

Met het gekortwiekte en geherkalibreerde model (Model III) zijn berekeningen uitgevoerd voor de situaties met en zonder continuering van de zandwinning op de Boven Merwede. De bodemveranderingen in de tijd zijn gepresenteerd in Figuur 4-4, Figuur 4-5 en Figuur 4-6.

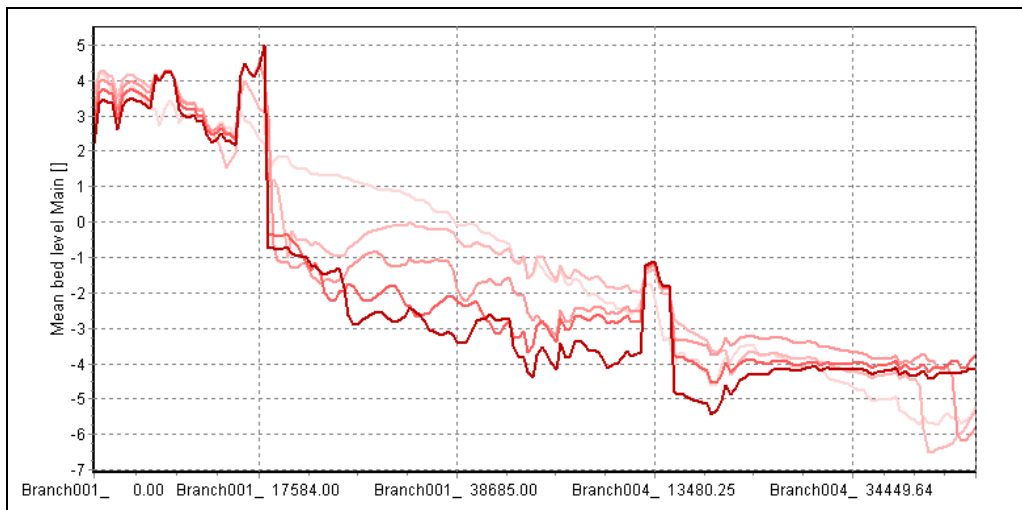


De verschillende kleurtinten in de eerste twee figuren geven de bodemontwikkeling aan: van licht in 1990 naar donker in 2100. Figuur 4-6 toont voor beide berekeningen het bodemverloop als functie van de tijd halverwege het zandwintraject op de Boven Merwede. De volgende zaken springen in het oog:

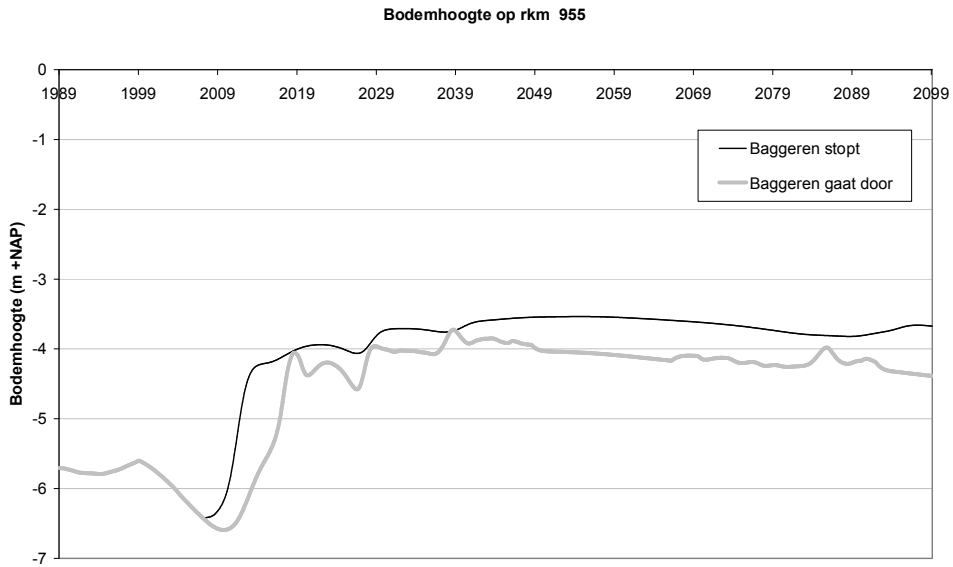
- Er vindt sedimentatie plaats op de vaste lagen van Nijmegen, Erlecom en Sint Andries. Dit komt doordat de vaste lagen zijn geschematiseerd als bodems die volledig bestaan uit de grofste sedimentfractie. De blootstellingscorrectie voor *hiding* en *exposure* leidt dan tot het ongewenste effect dat het grove sediment gemakkelijker getransporteerd wordt en het fijne sediment juist minder gemakkelijk. De sedimentatie op de vaste lagen volgt uit deze verminderde transporteerbaarheid van fijn sediment. Tegelijkertijd maakt de grotere transporteerbaarheid van grof sediment de vaste lagen instabiel. Om die lagen toch stabiel te houden is daarom de korrelgrootte van de grofste fractie sterk overdreven (Tabel 3-4). Dat versterkt echter weer de berekende sedimentatie, omdat het fijne sediment hierdoor nog meer wordt afgeschermd. Dit modelgedrag is niet realistisch. De morfologische module biedt op dit moment echter geen betere manier om de vaste lagen te schematiseren. Dit beperkt de betrouwbaarheid van de resultaten op dit traject;
- Tussen de vaste lagen, met name tussen Nijmegen en Sint Andries, treedt grootschalige erosie op. Op sommige locaties daalt de bodem orde 3,5 meter in 110 jaar, ofwel 3,2 cm per jaar. Dit kan deels worden toegeschreven aan een gering sedimentaanbod als gevolg van de sedimentatie op de vaste lagen. De zandwinning kan hiervan niet de oorzaak zijn. Op de Waal wordt immers vanaf 1997 geen zand meer gewonnen;
- Op de gehele Boven Merwede treedt, ook bij continuering van de zandwinning, netto sedimentatie op. Dit wordt veroorzaakt door een sedimentatiegolf die met een snelheid van ongeveer 0,3 kilometer/jaar vanuit de Waal de Boven Merwede in loopt. Achter deze sedimentatiegolf, net benedenstrooms van Sint Andries (branch004\_13480 in de Figuren 4-4 en 4-5), is echter een erosiegolf zichtbaar. Naar verwachting zal de bodem van de Boven Merwede hierdoor op langere termijn weer gaan dalen;
- Het omslagpunt van erosie naar sedimentatie ligt enkele kilometers benedenstrooms van Zaltbommel (km 941);
- In de eindsituatie ligt de bodem ter plaatse van Werkendam bij stopzetting van de zandwinning ongeveer een halve meter hoger dan wanneer zandwinning wordt gecontinueerd;
- Ondanks de stationaire randvoorwaarden treden in het gehele systeem onverklaarbare golfbewegingen op. Deze zijn gevisualiseerd in Figuur 4-7. De zes lijnen geven voor zes locaties nabij de bovenrand het bodemverloop weer als functie van de tijd. De lichtste lijn representeert de bij de Pannerdensche Kop opgelegde bodemdaling van 1,5 cm/jaar. De overige lijnen, beginnend met de groene lijn en eindigend met de lichtblauwe lijn, behoren bij locaties steeds verder stroomafwaarts. De golfvormige verstoringen ontstaan op enkele kilometers van de Pannerdensche Kop en planten zich stroomafwaarts voort met een periode van 4 à 5 jaar. Dit verschijnsel kan niet fysisch worden verklaard. Evenmin is het binnen dit project gelukt om dit verschijnsel te verklaren uit het rekenalgoritme of de implementatie daarvan in de software. Vooral nog beperken deze golfbewegingen de betrouwbaarheid van de resultaten nog verder.



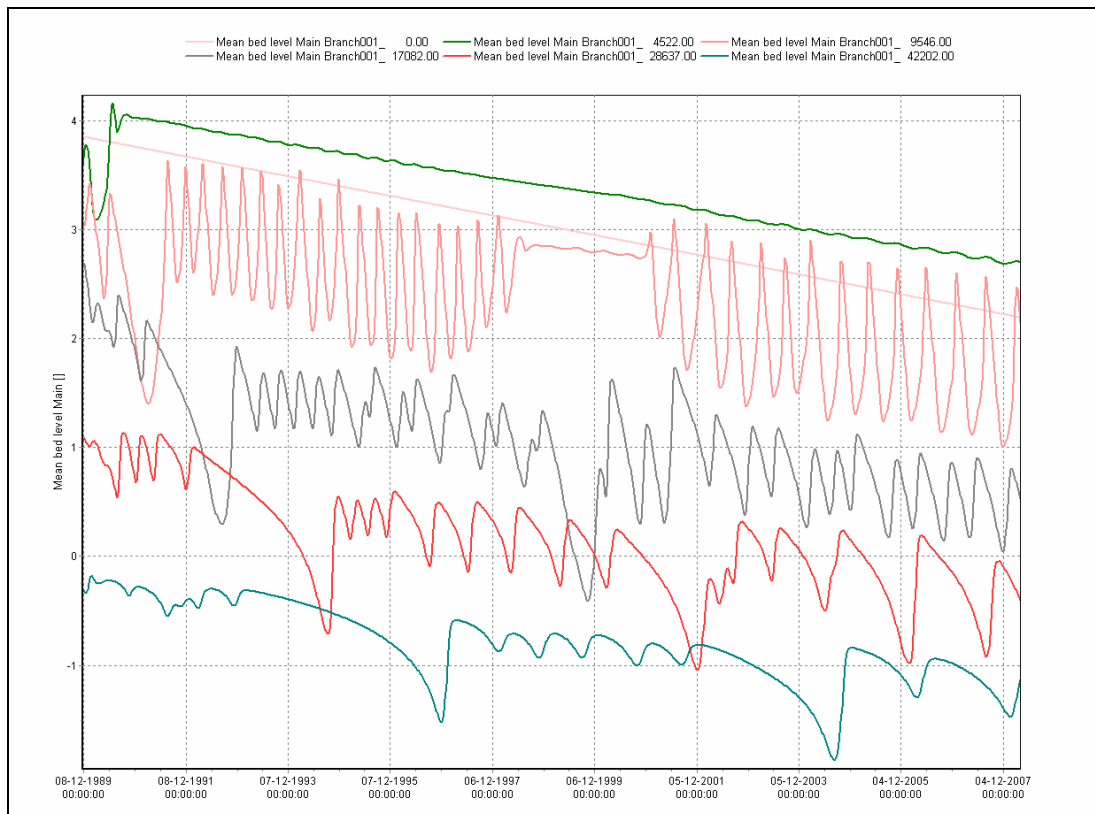
Figuur 4-4. Bodemveranderingen in periode 1990-2100 op traject Pannerdensche Kop – Werkendam bij stopzetting van de zandwinning.



Figuur 4-5. Bodemveranderingen in periode 1990-2100 op traject Pannerdensche Kop – Werkendam bij voortzetting van de zandwinning.



Figuur 4-6. Bodemverandering gedurende periode 1990-2100 op km 955, bij voortzetting en stopzetting van de zandwinning.



Figuur 4-7. Fluctuaties in berekende bodemontwikkeling voor enkele locaties bovenstrooms op de Waal (met hydrodynamische tijd op horizontale as).

## 4.2 Klimaatscenario

### 4.2.1 Introductie

Als gevolg van de verwachte klimaatverandering zal zowel de neerslag als de temperatuur in de stroomgebieden van de Maas en de Rijn veranderen. Hierdoor zullen ook de afvoeren van beide rivieren anders worden: waarschijnlijk zullen de hoge afvoeren in de winter verder toenemen, terwijl de lage afvoeren in de zomer juist verder afnemen. Daarnaast wordt verwacht dat de zeespiegel in de komende decennia zal gaan stijgen. Beide factoren zullen invloed hebben op de morfologische ontwikkeling van de rivieren. Hogere zeewaterstanden kunnen in het benedenstroomse gedeelte leiden tot lagere stroomsnelheden en dus sedimentatie of vertraging van de huidige trends van bodemdaling. De hogere piekafvoeren kunnen bovenstrooms juist meer erosie tot gevolg hebben, maar tevens is daarbij een hogere sedimentlast te verwachten die het tegenovergestelde effect bewerkstelligt. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van een korte analyse van de mogelijke effecten van klimaatverandering op de morfologie van de Waal en de Merwedde. Daarbij worden alleen zeespiegelrijzing en gewijzigde afvoeren in beschouwing genomen. Veranderingen in sedimentlast worden verwaarloosd.

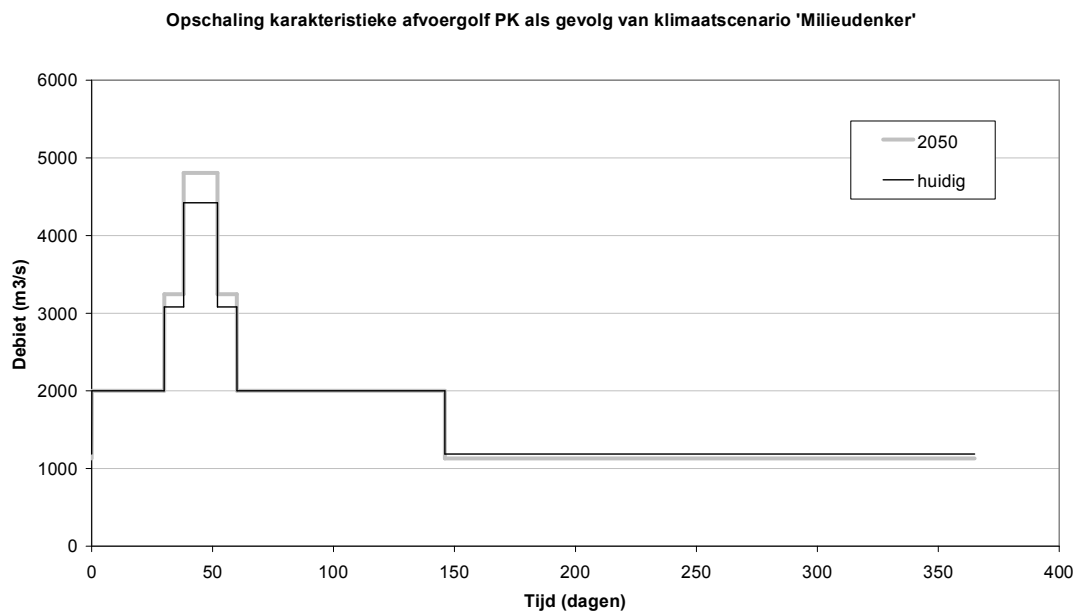
Er is inmiddels een breed scala aan klimaatscenario's beschikbaar. Tot medio 2006 waren de drie scenario's van de commissie Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw (WB21) de standaard (Können, 2001). Eind mei 2006 zijn vier nieuwe klimaatscenario's van het KNMI gepresenteerd als vervanging van de WB21 scenario's (van den Hurk et al, 2006). Deze scenario's verschillen op een aantal punten van de voorgaande set. Zo hebben de nieuwe scenario's allen een gelijke kans van voorkomen, wat bij de drie scenario's van WB21 niet het geval was. Verder wordt bij de KNMI'06-scenario's rekening gehouden met eventuele verandering in luchtstromingspatronen als gevolg van temperatuurstijging. Mede als gevolg hiervan neemt de hevige neerslag in de winter in de KNMI'06-scenario's minder toe dan in de WB21 scenario's. Het International Centre for Integrated assessment & Sustainable development (ICIS) heeft de genoemde scenario's gekoppeld aan zogenaamde 'wereldbeelden' of 'perspectieven', waarin verschillende sociaaleconomische toekomstscenario's zijn vastgelegd (ICIS, 2002, p.15, tabel 4.1). Deze scenario's onderscheiden zich onder meer van elkaar door de manier waarop tegen klimaatveranderingen wordt aangekeken en de wijze waarop hiermee in de ontwikkeling van het beleid wordt omgegaan. In deze studie is gebruik gemaakt van het *Milieudenkersscenario* zoals dat is uitgewerkt voor de oudere WB21-klimaatscenario's, met het jaar 2050 als tijdhorizon. Dit wereldbeeld is het meest extreme van de drie, met de grootste veranderingen in zeespiegel en neerslaghoeveelheden. Daarmee is het bijzonder illustratief voor de eventuele morfologische veranderingen in de grote rivieren. Verder is er een praktische reden voor deze keuze: voor deze combinatie van toekomstscenario's zijn al afvoerhydrografen voor de Pannerdensch Kop ontwikkeld<sup>3</sup>.

---

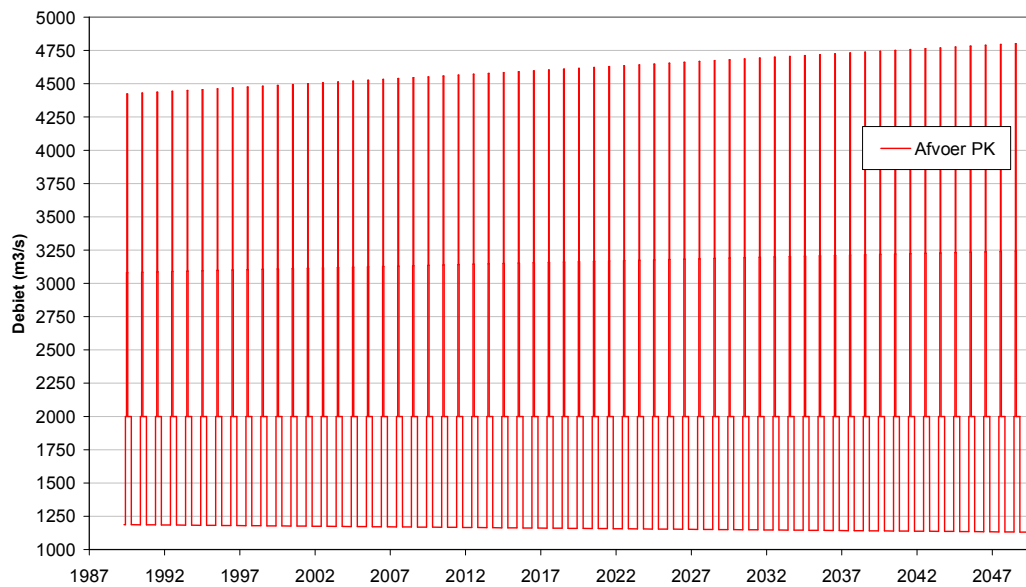
<sup>3</sup> Email van A. Sieben (RIZA) aan S. van Vuren (WL) d.d. 13 november 2006.

## 4.2.2 Modelbouw

Er is gebruik gemaakt van Model III, het ingekorte model dat ook gebruikt is voor het beheersscenario. Dit model omvat de gehele Waal en de Merwedede. Op de bovenrand bij de Pannerdensche Kop is een karakteristieke afvoerhydrograaf opgelegd, die in de tijd is geschaald volgens de uitgangspunten van het toekomstscenario. Figuur 4-8 toont hiervan het resultaat. Piekafvoeren worden groter, lage afvoeren worden iets kleiner. Figuur 4-9 toont de afvoertijdserie die op de bovenrand is opgelegd. Tussen de afvoerhydrografen van start en eind zijn alle afvoerniveaus afzonderlijk lineair geïnterpoleerd.

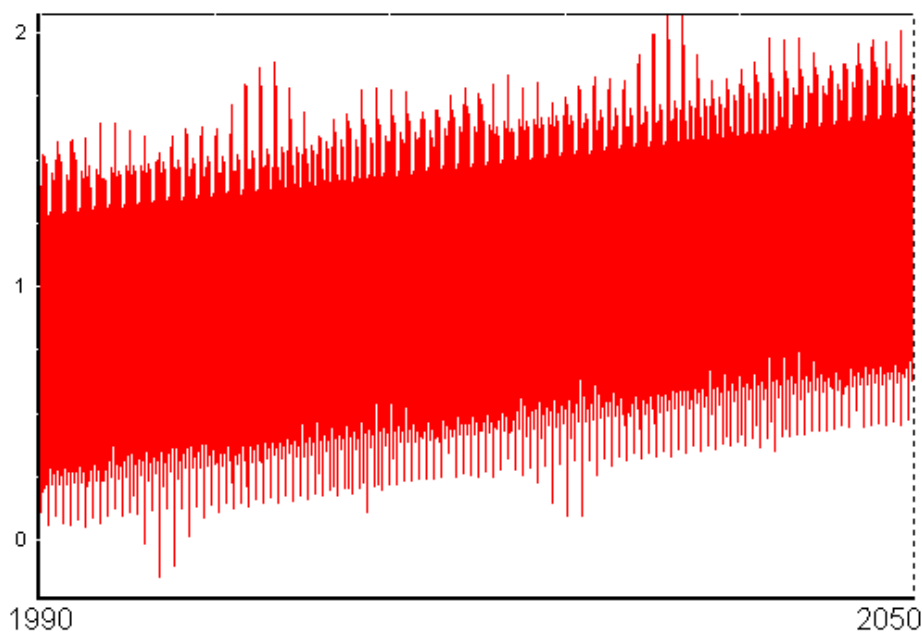


Figuur 4-8. Opschaling van karakteristieke afvoerhydrograaf volgens Milieudenkerscenario.



Figuur 4-9. Opgelegde afvoeren aan bovenrand bij Pannerdensch Kop.

De waterstandsvoorwaarden aan de benedenranden van de Nieuwe en de Beneden Merwede zijn geconstrueerd op basis van simulaties met het complete hydrodynamische (niet-morfologische) model van de Pannerdensch Kop tot Hoek van Holland. Hierbij nemen de waterstanden op zee lineair toe van 0 cm+NAP in 1990 tot 45 cm+NAP in 2050. De gesimuleerde waterstanden ter plaatse van de genoemde punten zijn vervolgens opgelegd op de benedenranden van het verkorte model. Figuur 4-10 toont ter illustratie de opgelegde waterstanden aan de benedenrand van de Beneden Merwede bij Dordrecht.



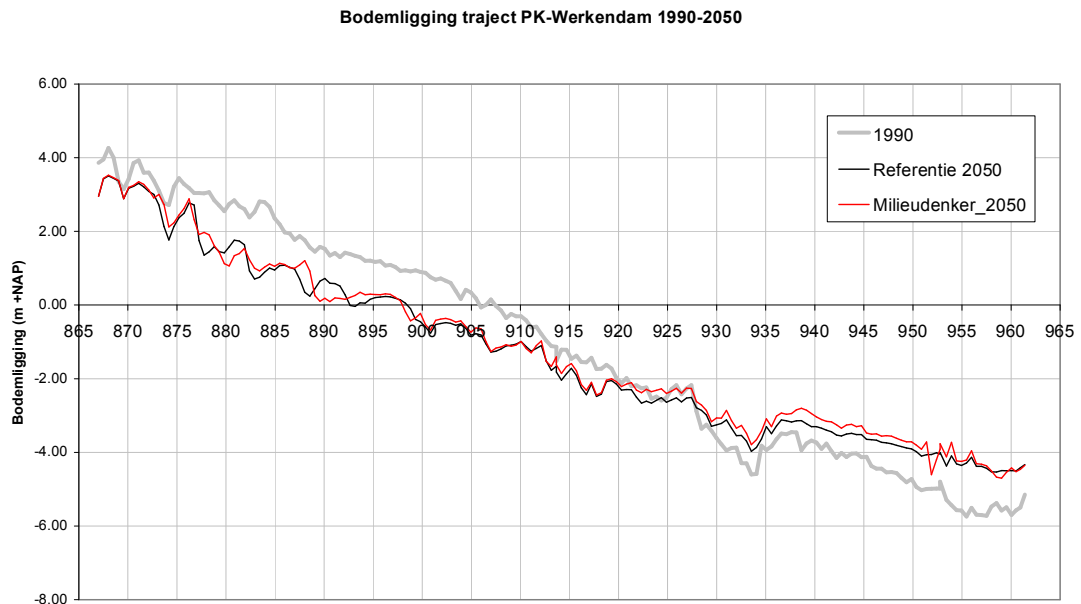
Figuur 4-10. Opgelegde waterstanden bij Dordrecht.

De analyse is uitgevoerd door het effect van klimaatverandering op de bodemligging van de Waal en de Boven Merwede te kwantificeren aan de hand van een vergelijking tussen een simulatie met klimaatverandering en een referentiesimulatie zonder klimaatverandering. Voor beide simulaties is gebruik gemaakt van een iets aangepaste versie van Model III: in verband met de geconstateerde artefacten in bodemontwikkeling op de Waal als gevolg van verkeerde afhandeling van de vaste lagen bij Erlecom, Nijmegen en Sint Andries, is besloten om deze lagen uit het model te verwijderen. De zandwinning op de Boven Merwede loopt in beide simulaties door tot 2050.

### 4.2.3 Resultaten

Figuur 4-11 presenteert het verschil in bodemligging voor de scenario's met en zonder klimaatverandering. Het eerder geconstateerde patroon in bodemontwikkeling blijft ongewijzigd: bovenstrooms op de Waal treedt grootschalige erosie op, benedenstrooms op de Beneden-Waal en de Boven Merwede sedimentatie. Het kantelpunt ligt rond km 923. De sedimentatie benedenstrooms is licht toegenomen als gevolg van de zeespiegelstijging. Hoewel de pieken in sedimenttransport zijn toegenomen, is het jaargemiddelde sedimenttransport afgenomen. Hierdoor treedt bovenstrooms gemiddeld minder erosie op. Over het gehele traject tussen de Pannerdensche Kop en Werkendam komt de bodem in 2050 gemiddeld 0,11 m hoger te liggen dan in het referentiemodel.

Het effect van de vaste lagen is in deze berekeningen niet meegenomen. Verder is hier gebruik gemaakt van het meest extreme klimaatscenario: voor andere scenario's zullen de verschillen met de referentiesituatie kleiner zijn. De hier gepresenteerde resultaten geven daarom slechts een kwalitatieve indicatie van de te verwachten effecten als gevolg van klimaatverandering.



Figuur 4-11. Ontwikkeling van het bodemlengteprofiel tussen de Pannerdensche Kop en Werkendam in de periode 1990-2050.





## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Er is een flinke stap voorwaarts gezet bij de ontwikkeling van een modelinstrumentarium waarmee de morfologie van de benedenrivieren en de effecten van ingrepen op de morfologie inzichtelijk kunnen worden gemaakt. Het gekalibreerde hydrodynamische model van de Rijn-Maasmonding is uitgebreid met de Waal tot aan de Pannerdensch Kop. Het morfologische model met gegradeerd sediment is geconverteerd van het oude instrumentarium (SOBEK-RE) naar het nieuwe (SOBEK-Rivers). Daarnaast is overgestapt op de nieuwe sedimenttransportformule van Van Rijn, waarmee het beter mogelijk moet zijn om de sedimentatie van slib in de delta te modelleren.

De huidige resultaten moeten echter wel gezien worden als een tussenproduct. De noodzakelijke vereenvoudigingen, met name die aan het hydrodynamische model ten behoeve van stabiliteit van de morfologie, hebben geresulteerd in een model met een grote onzekerheidsmarge en beperkte inzetbaarheid. Daarom moet, zodra het operationeel is, worden overgestapt op het nieuwe morfologische instrumentarium (DELWAQ). De in dit project ontwikkelde schematisaties kunnen bij deze overstap als een goed uitgangspunt worden beschouwd;

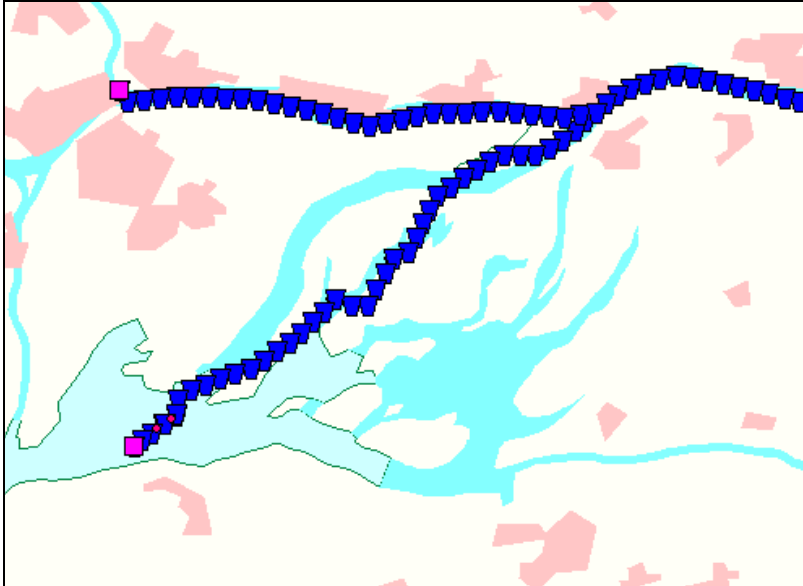
Voor een degelijke morfologische kalibratie ontbreken nog veel data. Zo is er te weinig bekend over de jaargemiddelde sedimenttransporten op de verschillende takken in het Rijn-Maasmonding gebied: op dit moment zijn alleen ruwe schattingen voorhanden op enkele locaties op de Waal en de Merwedens. Verder zijn eigenlijk nauwelijks meetgegevens voorhanden met betrekking tot de fractieverdeling in de verschillende takken voor het zeer fijne materiaal (<63  $\mu$ ), terwijl dit wel een belangrijk aandeel vormt van het bodemmateriaal in de delta.

### 5.2 Aanbeveling ten aanzien van hydrodynamische modellen

De gebruikte hydrodynamische modellen zijn in het verleden vooral gekalibreerd voor hoogwatersituaties, waarbij met name gekeken is naar waterstanden. Voor de morfologie zijn lagere afvoeren, stroomsnelheden en debietverdelingen op splitsingspunten eveneens van belang. Aanbevolen wordt daarom om bij toekomstige kalibraties van het hydrodynamische model ook deze grootheden te betrekken.

Het gebruikte landsdekkende hydrodynamische model is samengesteld uit deelmodellen van de Maas, de Rijntakken en de Rijn-Maasmonding. Op dit moment is het onduidelijk wat het gevolgde protocol is bij de kalibratie van het gecombineerde model. Wanneer is die uitgevoerd en volgens welke procedure? Het verdient aanbeveling deze informatie te achterhalen, aangezien deze van belang is voor de verdere ontwikkeling, zowel met betrekking tot het hydrodynamische als het morfologische model.

Bij de oorspronkelijke conversie van het landsdekkende RE-model van de grote rivieren zijn verschillende onvolkomenheden en fouten aan het licht gekomen. Zo bleek dat de lengtes van verscheidene riviertakken in dat model kleiner waren dan de werkelijke geografische lengtes. Verder bleek dat sommige takken niet op de juiste plaats lagen, zoals voor de Nieuwe Merwede geïllustreerd wordt in Figuur 5-1. Dat laatste hoeft op zich geen probleem te zijn, maar vergroot wel de kans op fouten. Aanbevolen wordt om de oorspronkelijke modellen te controleren en waar nodig te corrigeren.



Figuur 5-1. Verschil tussen ligging van Nieuwe Merwede in SOBEK-model en daadwerkelijke ligging.

Binnen de ontwikkeling van SOBEK vindt op dit moment een overgang plaats, waarbij alle specifieke functionaliteiten van het verouderde SOBEK-RE worden opgenomen in het nieuwe SOBEK-Rivers. De verschillende schematisaties van de Maas, de Rijn-Maasmonding en de Rijntakken worden op dit moment nog onderhouden in SOBEK-RE. Binnen SOBEK-Rivers is een import-routine beschikbaar waarmee RE-modellen kunnen worden geconverteerd naar Rivers-modellen. Aangezien de rekenharten van de beide systemen verschillend zijn, zijn de resultaten van een geconverteerd model vaak anders, vooral rondom kunstwerken. Daardoor is meestal een beperkte herkalibratie noodzakelijk. Dit alles levert een arbeidsintensief traject op om toekomstige hydrodynamische RE-modellen gereed te maken voor morfologische berekeningen met het Rivers-instrumentarium. Aanbevolen wordt om voor morfologische berekeningen zo spoedig mogelijk volledig over te stappen op SOBEK-Rivers.

### 5.3 Aanbeveling ten aanzien van morfologische modellen

Om het SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding ook geschikt te maken voor de berekening van morfologische veranderingen als gevolg van slibtransport, hebben Mosselman et al (2005) een korte-termijnspoor en een lange-termijnspoor voorgesteld. Het korte-termijnspoor betreft de inbouw van nieuwe sedimenttransportcapaciteitformules van Van Rijn, die een uitbreiding naar slib inhouden van Van Rijn's oude zandtransportformules. Dit inbouwen is binnen het huidige project uitgevoerd. Van Rijn's formules blijken echter niet alle slibgerelateerde processen goed te simuleren.

Ze kunnen niet gebruikt worden voor spoeltransport of de erosie van cohesief bodemmateriaal. Bovendien heeft het huidige project zoveel vertraging opgelopen, dat een model volgens dit korte-termijnspoor niet meer veel eerder zal worden opgeleverd dan een model volgens het lange-termijnspoor. Daarom wordt aanbevolen om voor het vervolg uitsluitend het lange-termijnspoor aan te houden. Dit betreft het bouwen van een koppeling met het waterkwaliteitsmodel DELWAQ op een zodanige manier dat erosie en sedimentatie van de bodem bepaald kunnen worden uit met DELWAQ berekende resuspensie en sedimentatie van slib. Deze ontwikkeling is inmiddels ver gevorderd (Sloff et al, 2007). De nieuwe module zal een goed uitgangspunt kunnen vormen bij een toekomstige herkalibratie van het morfologische model.

De hydrodynamische modelschematisaties van de Maas, de Rijn-Maasmonding en de Rijntakken bevatten details die voor een morfologisch model onnodige ballast vormen. Ze verhogen niet of nauwelijks de nauwkeurigheid van morfologische berekeningen, maar vergroten de rekentijden en de kans op numerieke instabiliteiten. Van essentieel belang zijn dan vereenvoudigingen om het morfologische model snel en robuust te maken. Aanbevolen wordt om hiervoor een optimale methodiek te ontwikkelen, en deze vast te leggen in een protocol dat bij iedere actualisering van de hydrodynamische modelschematisaties gebruikt kan worden.

Nauwkeurige gegevens over baggerwerken en zandwinning in het verleden zijn van doorslaggevend belang voor een goede morfologische kalibratie. In sommige riviertakken speelt de onttrekking van sediment een dominante rol in de sedimentbalans. Veel directe gegevens over baggervolumes in het verleden zijn verloren gegaan. In de studie naar de effecten van zandwinning op de Merwedede is echter gebleken dat de zandwinners historische baggervolumes kunnen reconstrueren op basis van nog beschikbare indirecte gegevens als financiële omzet en specificaties van ingezet baggermateriaal. Op basis van die indirecte gegevens concluderen de zandwinners dat in het verleden wellicht tweemaal zoveel sediment is onttrokken als blijkt uit de gegevens van Rijkswaterstaat (Mosselman & Wijbenga, 2007). Aanbevolen wordt om de zoektocht langs deze weg voort te zetten en de resultaten daarvan gedegen te analyseren.

Er zijn weinig meetgegevens beschikbaar van de samenstelling van sediment met korrelgroottes kleiner dan  $63 \mu\text{m}$  in de gebieden waar dergelijk fijne fracties een rol spelen. Dat zijn in feite alle gebieden benedenstrooms van de Boven Merwedede. Aanbevolen wordt om hierop meetcampagnes te richten.



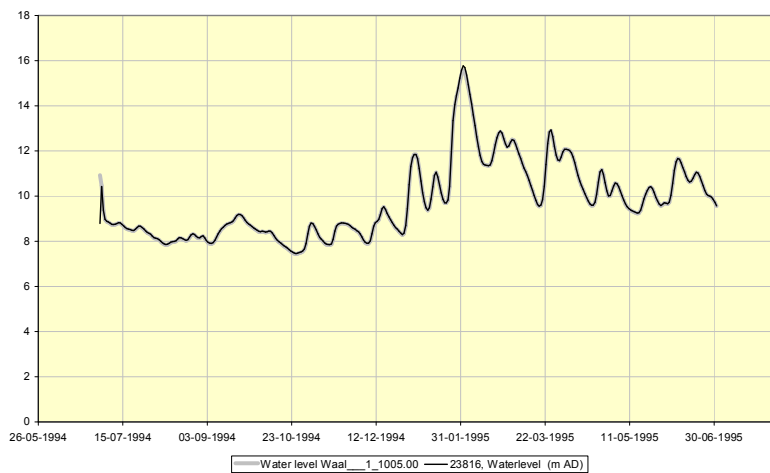
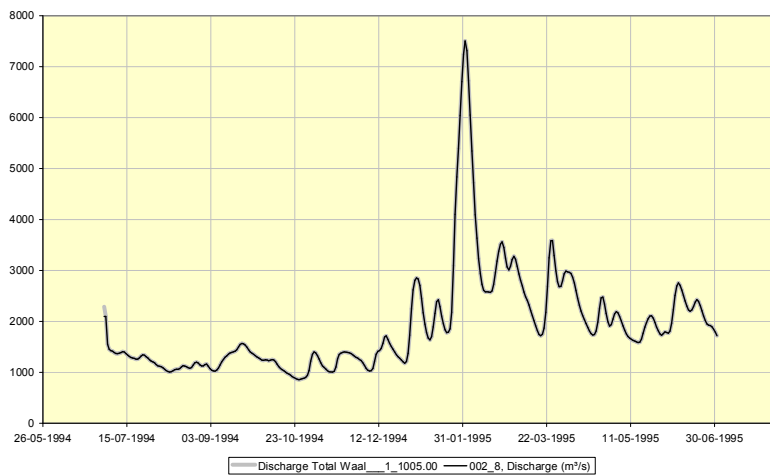
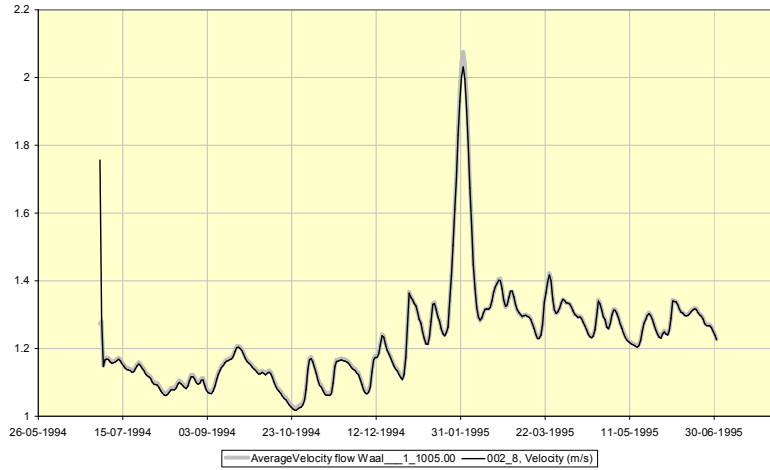
## 6 Literatuurverwijzingen

- Brinke, W.B.M. ten, L.J. Bolwidt, E. Snippen & L.W.J. van Hal (2001). Sedimentbalans Rijntakken 2000. Rapport 2001.043, Rijkswaterstaat RIZA.
- Flokstra, C. & J. Crebas (2004), Sobek-Rural/Morpho; User's guide. Internal documentation, WL | Delft Hydraulics.
- Fugro Ingenieursbureau (2002), Laboratoriumresultaten betreffende morfologisch modelleren (Nr. 610106004). Opdrachtnummer H-4086.
- Hurk, B. van den, A. Klein Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsman, H. van den Brink, F. Keller, J. Bessembinder, G. Burgers, G. Komen, W. Hazeleger & S. Drijfhout (2006), KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-01, May 2006.
- ICIS (2002), Scenario's voor de droogtestudie Nederland. Memo International Centre for Integrative Studies (ICIS), Universiteit Maastricht, juli 2002.
- Können, G.P. (2001), Climate scenarios for impact studies in the Netherlands. Notitie KNMI, May 2001.
- Latteux, B. (1987), Transport modelling of particulate matter – methodology of long-term simulation of bed evolutions. Laboratoire Nationale d'Hydraulique, Chatou, Rep. HE-42/87.25.
- Latteux, B. (1995), Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. Marine Geology, Vol.126, pp.129-141.
- Ledden, M. van (2003), Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins. PhD Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9016786-2.
- Mol, A.C.S. (2003), Morfologische gevolgen van rivierverruimende maatregelen langs de Merwedens; Opzet en toepassing van een SOBEK-model. Rapport afstudeeropdracht, Rijkswaterstaat RIZA en Universiteit Twente.
- Mosselman, E., J. Crebas, J. Icke, K. Sloff & Z.B. Wang (2005), Bouwstenen voor nieuw morfologisch SOBEK-model van de Rijn-Maasmonding. Rapport Q4083.00, WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E. & A. Wijbenga (2007), Morfologische effecten van zandwinning in de Merwedens. Rapport Q4303, WL | Delft Hydraulics & HKV Lijn in Water.
- Roelvink, J.A. (2006), Coastal morphodynamic evolution techniques. Coastal Engrg., Vol.53, pp.277-287.
- Sloff, C.J. (2006), Uitbreiding SOBEK-RT model naar niet-uniform sediment. Rapport Q4130.10, WL | Delft Hydraulics.
- Sloff, C.J. & E. Verschelling (2006), Tussentijdse rapportage die uiteindelijk verwerkt is in Sloff et al (2007).
- Sloff, C.J., E. Verschelling, A. Hauschild & J. Crebas (2007), Morfologisch SOBEK model Rijn-Maasmonding. Rapport Q4239, WL | Delft Hydraulics.
- Snippen, E., A. Fioole, H. Geelen, A. Kamsteeg, A. van Spijk & T. Visser (2005), Sediment in (be)weging; Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Rapport 2005.023, Rijkswaterstaat Zuid-Holland, september 2005.
- Vuren, S. van & C.J. Sloff (2006), Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach. Rapport Q4130, WL | Delft Hydraulics.

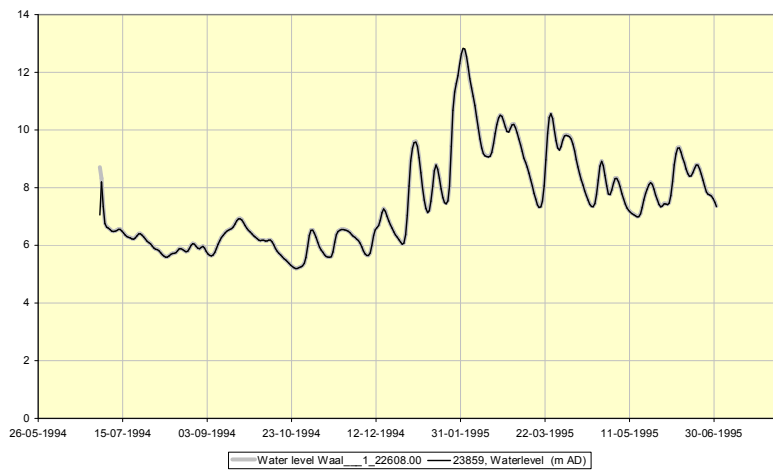
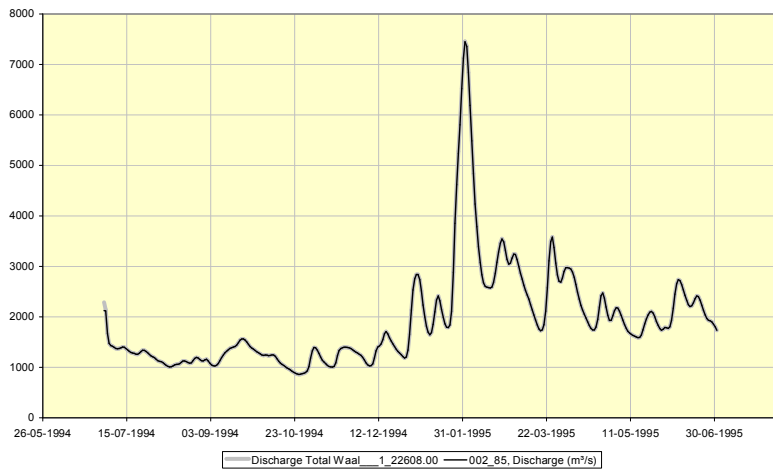
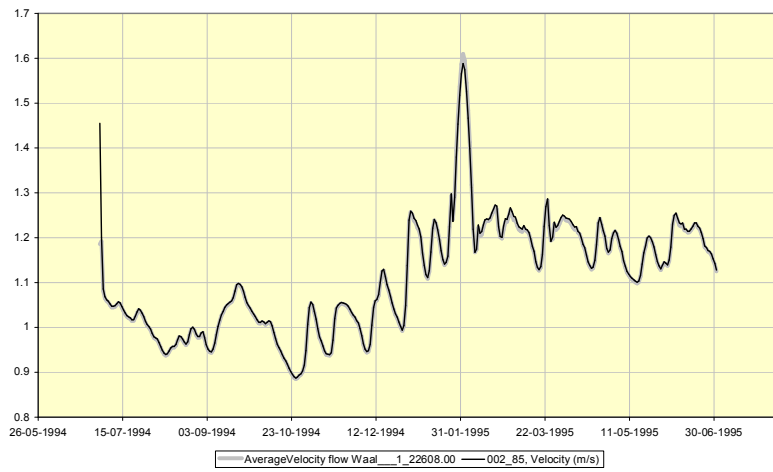


# A Resultaten test hydraulisch model – SOBEK-RE versus SOBEK-Rivers

Locatie: Waal nabij Pannerdensch Kop

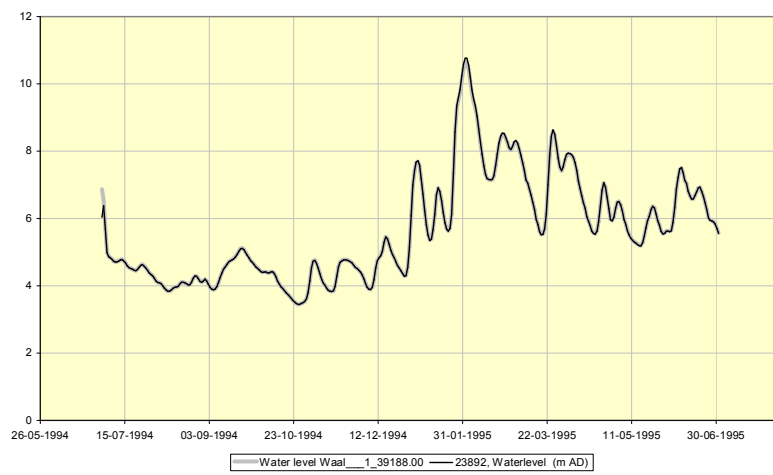
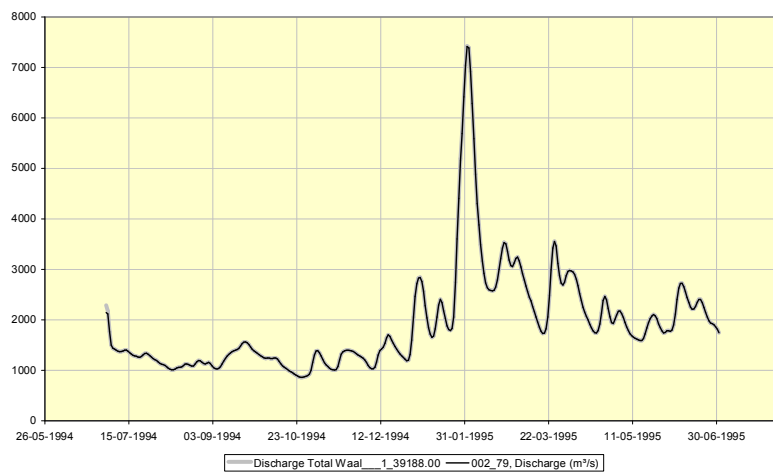
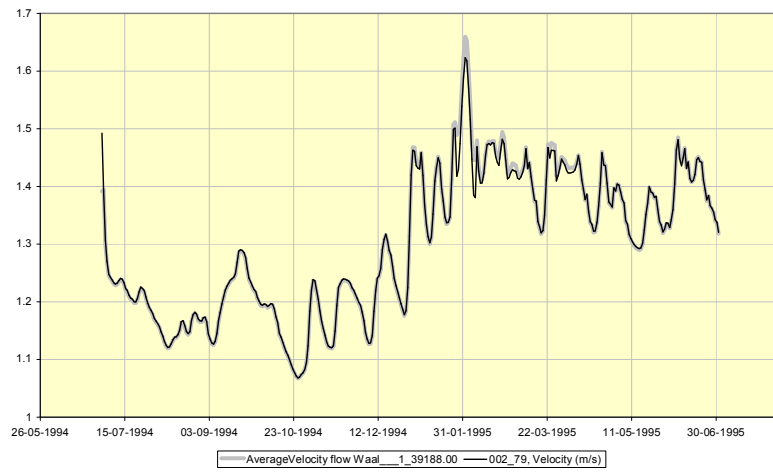


### Locatie: Waal nabij Nijmegen



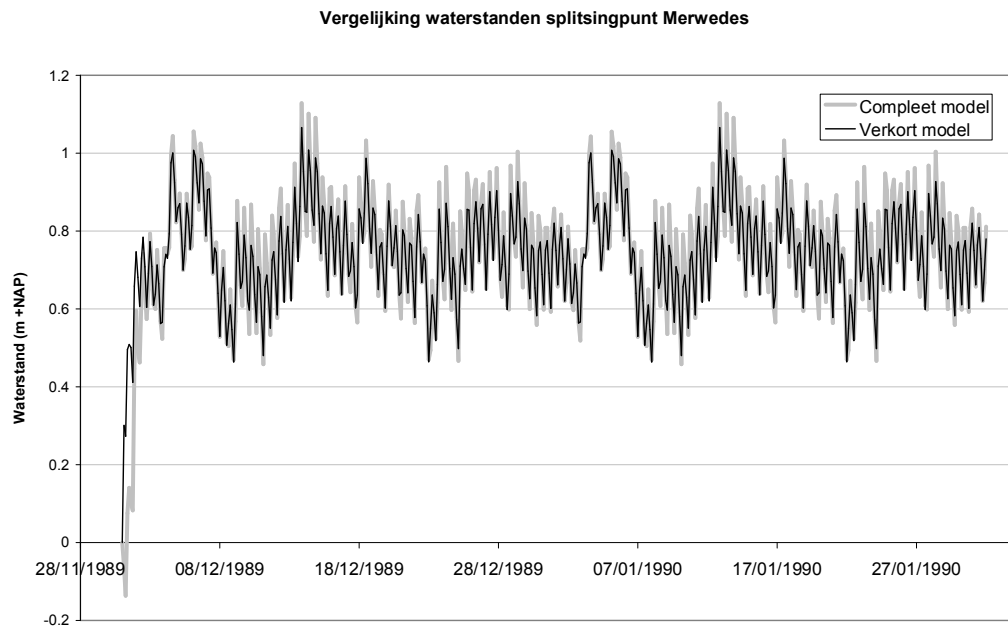


### Locatie: Waal bij Tiel

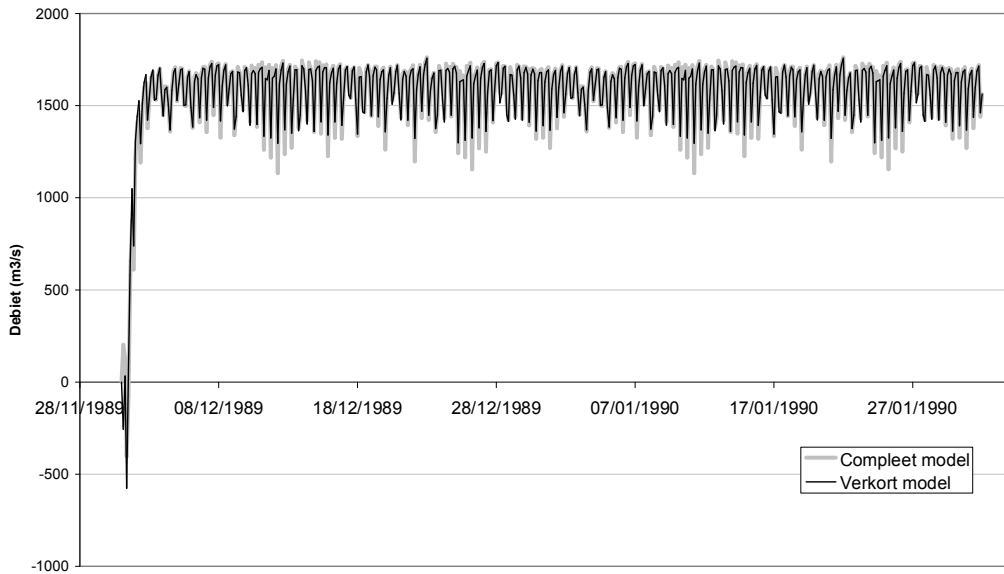




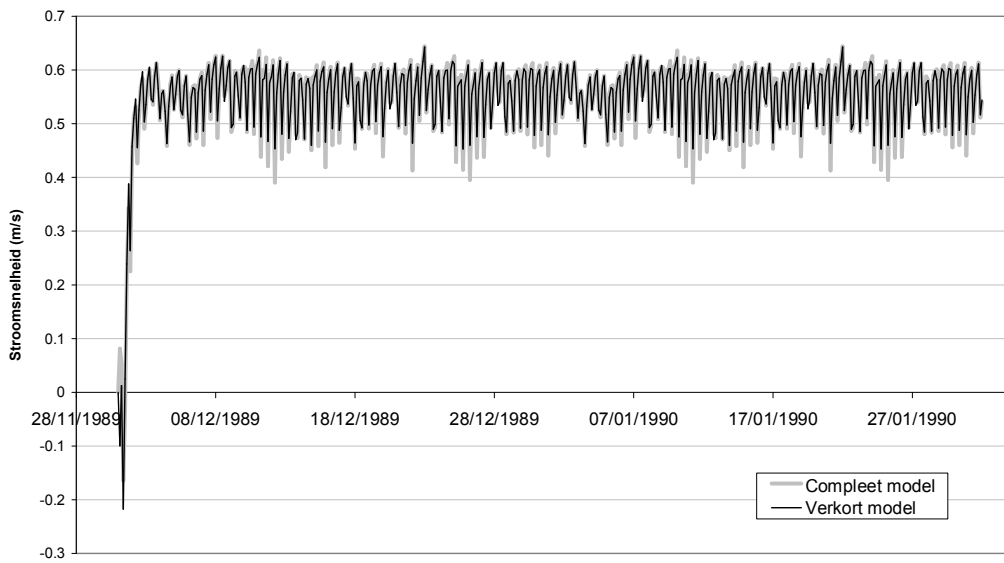
## B Resultaten test hydraulisch model – compleet model versus verkort model



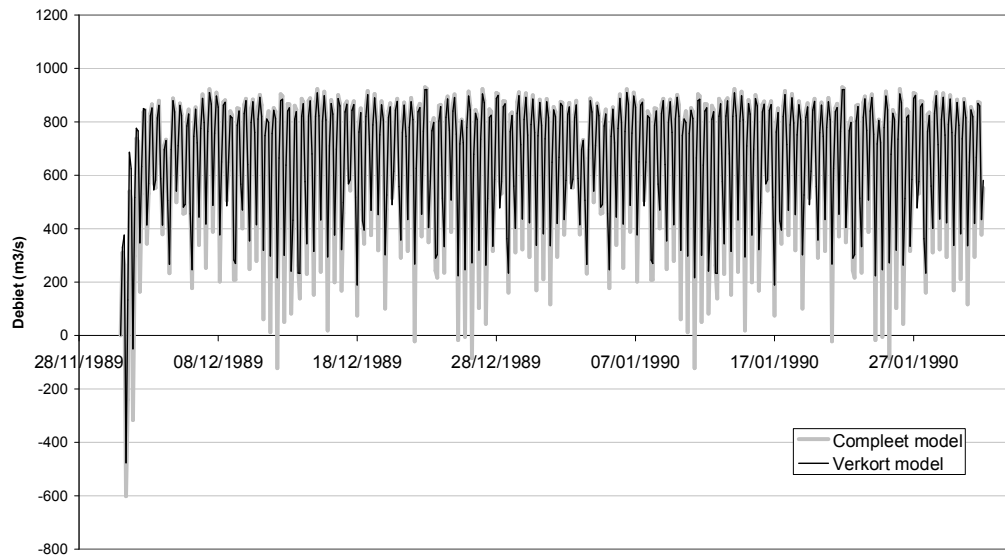
Vergelijking debieten bovenstreams splitsingpunt Merweddes



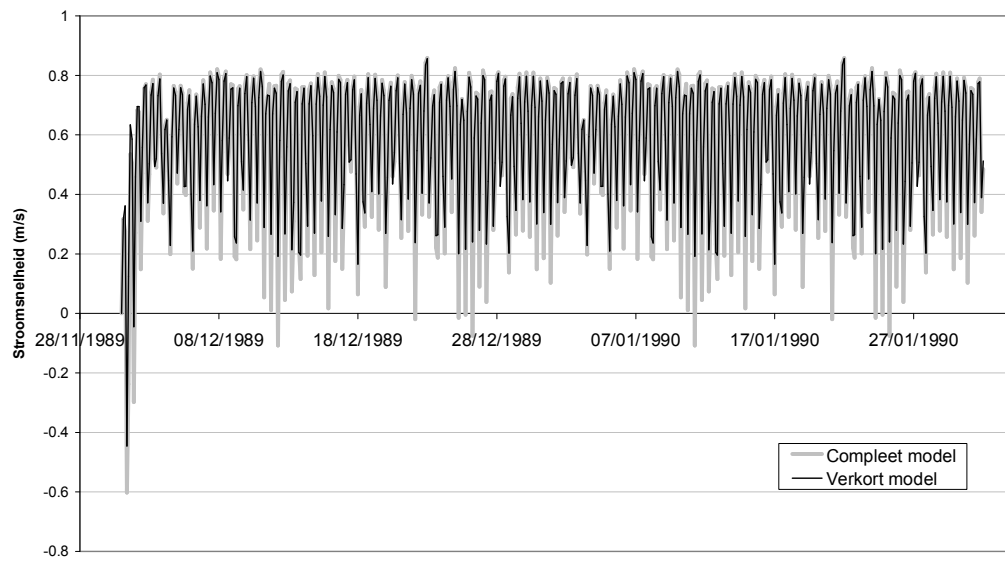
Vergelijking stroomsnelheid bovenstreams splitsingpunt Merweddes



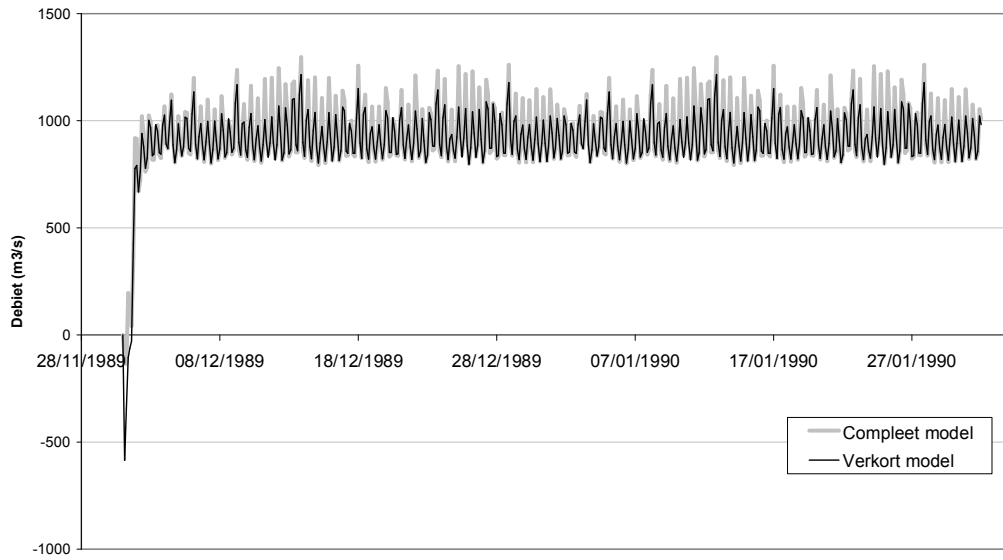
Vergelijking debiet begin Beneden Merwede



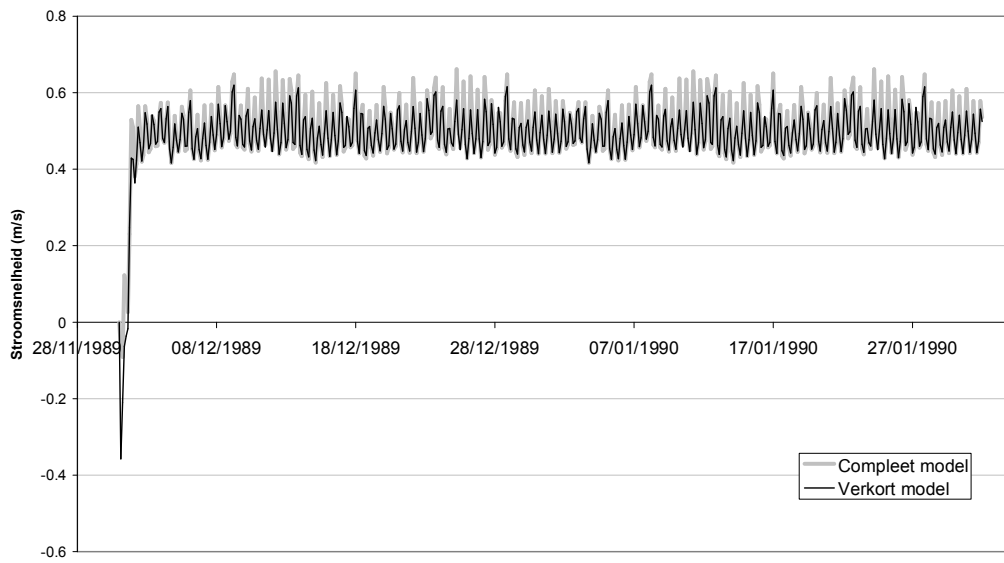
Vergelijking stroomsnelheid begin Beneden Merwede



Vergelijking debiet begin Nieuwe Merwede



Vergelijking stroomsnelheid Nieuwe Merwede



## C Overzicht berekeningen voor grootschalige morfologische effecten (Model II)

# simulatie	Omschrijving
1	Eerste berekening met morfologie 1990-2000
2	Als 1, enkele correcties doorgevoerd
3	Als 2, enkele correcties doorgevoerd
4	Als 3, vRijn gebruikt voor alle takken (mogelijk dankzij nieuwe morfo.exe)
5	Als 12, calibratiefactor 2/3 ipv 1
6	Als 12, calibratiefactor 4/3 ipv 1
7	Als 4, vaste laag bij St.Andries gemodelleerd (ontbrak eerder)
8	Als 12, dikte vaste laag 1,0 meter ipv 0,5 meter
9	Als 4, calibratiefactor 3/2 ipv 1
10	Als 4, calibratiefactor 2 ipv 1 (gecrasht agv extreme Courant waarden)
11	Als 4, MPM transportformule op Waal ipv vRijn
12	Als 7, bovenrand Waal jaarlijkse daling van 1,5cm ipv 3,0cm
13	Als 12, zonder baggerwerk
14	Als 6, splitsingspuntrelatie Merwedde Wang machtsrelatie (k,m)=(3,-1) ipv (2,-1)
15	Als 14, met (k,m)=(4,-1) ipv (2,-1)

Enkele opmerkingen:

- In geel: simulaties waarvan uitvoer in de vorm van trajectgemiddelde bodemveranderingen is opgenomen in appendix D;
- Som 12 is het referentiemodel;
- Som 6 (gebaseerd op 12, maar met een kalibratiefactor 4/3) heeft uiteindelijk de beste resultaten opgeleverd.



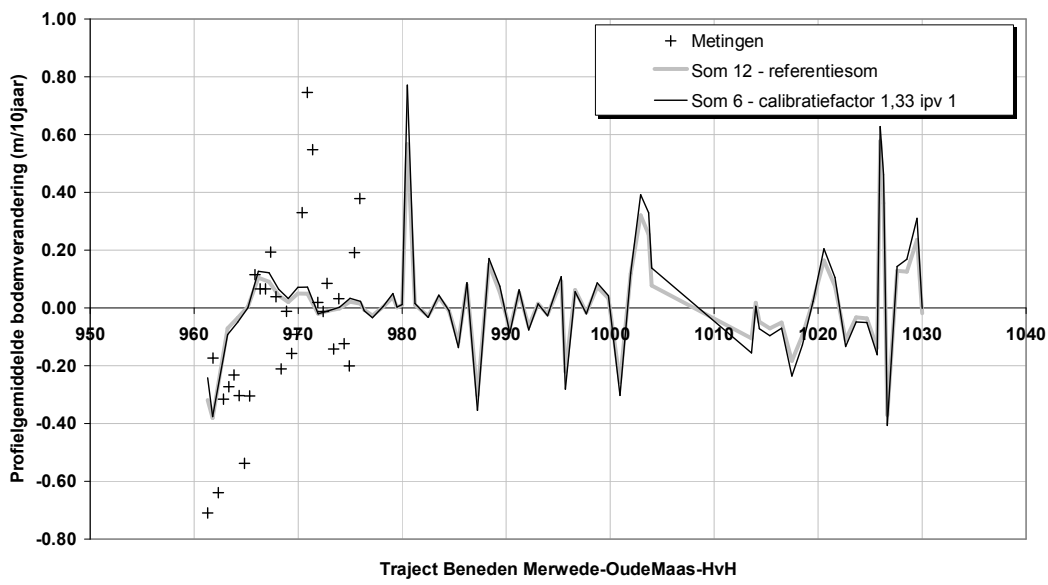
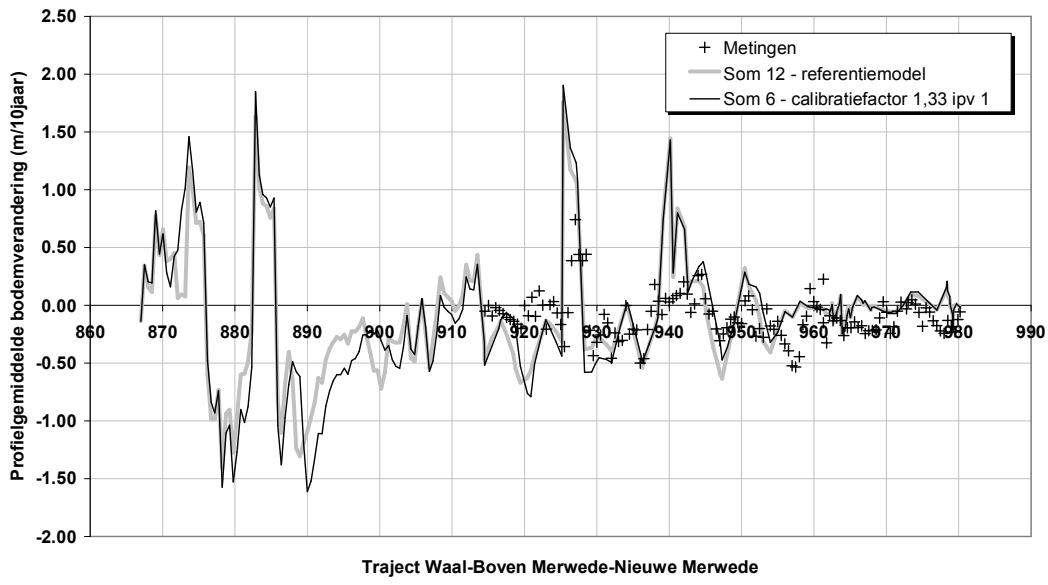


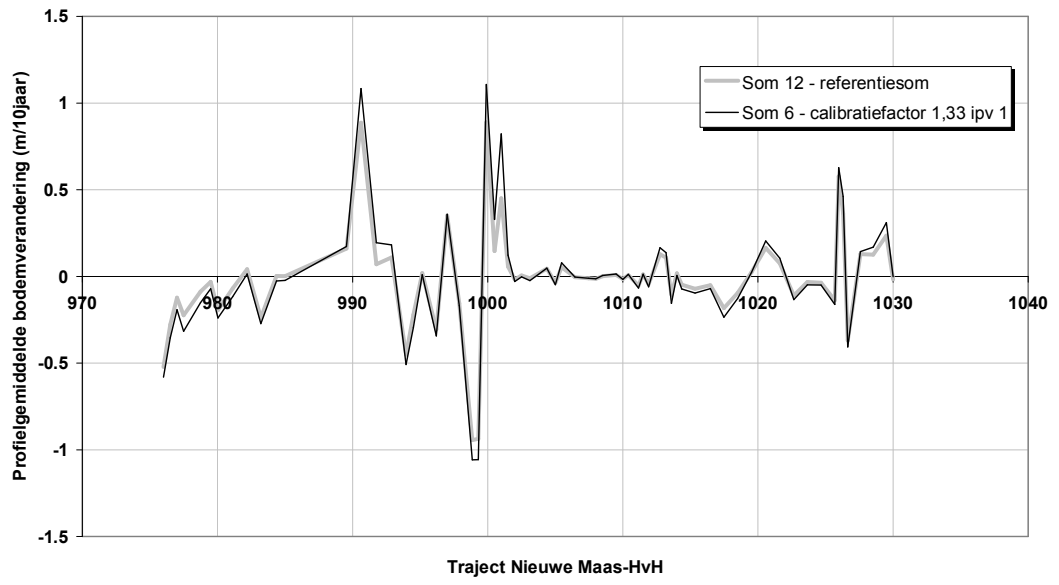
## D Resultaten morfologische kalibratie – bodemveranderingen

Tak	Metingen (cm/j)	Som 12	Som 13	Som 8	Som 5	Som 6	Som 14
Boven+Midden Waal	-2.00	-1.62	-1.07	-1.49	-1.14	-2.10	-2.10
Beneden Waal	-1.00	-0.41	0.50	-0.62	-0.77	-0.15	-0.16
Boven Merwede	-3.80	-1.10	0.86	-1.10	-1.30	-0.76	-0.76
Beneden Merwede	-1.60	-0.25	0.18	-0.25	-0.39	-0.14	-0.31
Nieuwe Merwede	-0.20	-1.20	-0.57	-1.21	-0.92	-1.42	-1.41
Noord	-2.90	-0.99	-0.98	-1.00	-0.69	-1.29	-1.29
Lek	-2.90	-0.43	0.57	-0.43	-0.57	-0.31	-0.31
Nieuwe Maas O	0.00	0.96	0.94	0.90	0.66	1.28	1.28
Nieuwe Maas W	0.00	-1.59	-1.57	-1.56	-1.09	-2.04	-2.04
Nieuwe Waterweg	0.00	0.14	0.14	0.13	0.10	0.17	0.17
Oude Maas O	0.00	2.28	2.35	2.32	1.50	3.07	3.05
Oude Maas M	-4.50	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02
Oude Maas W1	-8.20	-0.12	-0.12	-0.12	-0.17	-0.05	-0.05
Oude Maas W2	-10.30	1.06	1.06	1.13	0.74	1.38	1.38
Spui	-1.80	-0.55	-0.55	-0.56	-0.43	-0.65	-0.65
Bergsche Maas	-2.10	-0.41	0.25	-0.41	-0.50	-0.32	-0.32
Amer	-1.90	1.48	1.20	1.45	1.00	1.87	1.85
Hollandsch Diep O	-0.90	0.48	0.49	0.50	0.33	0.62	0.62
Dordtsche Kil	-6.20	-1.87	-1.89	-1.91	-1.37	-2.32	-2.31
Hollandsch Diep W	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Enkele opmerkingen:

- In geel: metingen. In groen: trend (erosie / sedimentatie) klopt. In rood: trend klopt niet;
- De omschrijving van de sommen is terug te vinden in bijlage C. Zo is som 12 de referentiesom, met de instellingen beschreven in Paragraaf 3.2.2;
- Som 5 (kalibratiefactor 2/3) presteert voor wat betreft de bodemveranderingen duidelijk het best. Helaas neemt het sedimenttransport, dat in het referentiemodel al aan de lage kant is, nog verder af. Hierdoor zal de snelheid van verstoringen in de bodem te laag zijn;
- In het zuidoosten van het systeem wijken de resultaten het meest af van de metingen. Hier speelt vermoedelijk mee dat de huidige morfologische module niet in staat is de sedimentatie goed weer te geven van het fijne materiaal dat als spoeltransport het systeem via de bovenrand is binnengetrepen. Al het transport vindt immers plaats via de transportlaag. Verder kunnen incorrecte baggergegevens hier een rol spelen.







## E Resultaten morfologische kalibratie – sedimenttransporten

