Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Case studies Duurzame Vaardiepte Rijndeltata

Rapport

mei 2007

WL | delft hydraulics

Q4245.00

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA

Case studies Duurzame Vaardiepte Rijndeltata

Erik Mosselman, Saskia van Vuren, Mohamed Yossef, Willem Ottevanger en Kees Sloff

Rapport

mei 2007

WL | delft hydraulics

OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat RIZA
TITEL:	Case studies Duurzame Vaardiepte Rijndelta

SAMENVATTING:

Vaarwegverruiming is een van de onderdelen van het project Toekomstvisie Waal binnen het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT). Omdat hierbij in toenemende mate knelpunten verwacht worden, heeft de rivierbeheerder behoefte aan een morfologisch voorspelinstrument voor het traject Rijnmond-Duisburg. Dit wordt geleidelijk ontwikkeld, waarbij het volledige model over een aantal jaren (binnen 2012) beschikbaar zal komen. Een eerste model is echter in 2006 gebouwd. Dit wordt hier toegepast voor drie *casestudies* om inzicht te verkrijgen in enerzijds de effectiviteit van bepaalde maatregelen in de vaarweg en anderzijds de mogelijkheden van het nieuwe morfologische model.

Casestudy A betreft een grootschalige maatregel tussen km 868 en 920, die bestaat uit de aanleg van langsdammen die de rivier bij lage afvoeren versmalt, en kribverlaging die de rivier bij hoge afvoeren verruimt. Gevonden wordt dat deze maatregel een aantal knelpunten voor de scheepvaart oplost. Op het knelpunt km 883-884 in de bocht bij Nijmegen blijkt de aanleg van langsdammen echter juist de bevaarbaarheid te verslechteren. Mogelijk is dit te verklaren uit de bevinding van Sloff et al (2006) dat vaste lagen leiden tot *aanzanding* van de binnenbocht als bochten smal zijn. Gevonden is verder dat de afvoeronttrekkingen aan het begin van de langsdammen knelpunten veroorzaken.

Casestudy B betreft een verandering in beheer die nodig is als de vaarweg wordt verruimd van 150 m × 2,5 m naar 170 m × 2,8 m. De ten behoeve van deze casestudy verbeterde functionaliteit voor baggeren en storten blijkt in principe een sterk en flexibel hulpmiddel te zijn voor het evalueren van verschillende baggerstrategieën. De betrouwbaarheid van de resultaten is echter vooralsnog gering. Dit is mogelijk te wijten aan de schematisatie, het niet gebruiken van een duinhoogtevoorspeller of de te hoge berekende OLR.

Casestudy C betreft suppletie van sediment in erosiegebieden om voortgaande daling van de rivierbodem een halt toe te roepen. De simulaties laten zien dat de grove fracties van het gesuppleerde materiaal zich langzamer stroomafwaarts verplaatsen dan de fijne fracties. Daardoor wordt het bodemmateriaal grover in de actieve laag van de trajecten waar gesuppleerd is. Suppletie met grover materiaal blijkt efficiënter dan suppletie met materiaal dat dezelfde eigenschappen heeft als het al ter plaatse aanwezige sediment. De invloeden van de actieve-laagdikte en het aantal korrelfracties op de resultaten zijn uitvoerig geanalyseerd, onder meer aan de hand van een wiskundige karakteristiekenanalyse.

REFERENTIES:	RI-4651 "Case studies Duurzame Vaardiepte Rijndelta"

VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1.0	Erik Mosselman	11 dec 2006		Frans van der Knaap	
3.0	Saskia van Vuren	5 maart 2007			
4.0	Erik Mosselman	11 mei 2007			
5.0	Erik Mosselman	24 mei 2007		Frans van der Knaap	Kees Bons

PROJECTNUMMER:	Q4245
TREFWOORDEN:	Riviermorfologie, tweedimensionaal model
AANTAL BLADZIJDEN:	105
VERTROUWELIJK:	☒ JA, tot januari 2008 ☐ NEE
STATUS:	☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF

Inhoud

1 Inleiding ..... 1—1

1.1 Achtergrond ..... 1—1

1.2 Opdracht ..... 1—2

1.3 Organisatie ..... 1—3

2 Kalibratie ..... 2—1

2.1 Kalibratie van Waalmodel ..... 2—1

2.1.1 Kalibratiegrootheden ..... 2—1

2.1.2 Gereedmaken van model voor kalibratie ..... 2—2

2.1.3 Modelinstellingen na kalibratie ..... 2—4

2.1.4 Resultaten ..... 2—9

2.2 Kalibratie van Bovenrijnmodel ..... 2—12

2.2.1 Kalibratiegrootheden ..... 2—12

2.2.2 Gereedmaken van model voor kalibratie ..... 2—16

2.2.3 Modelinstellingen na kalibratie ..... 2—18

2.2.4 Resultaten ..... 2—21

3 Casestudy A: langsdammen ..... 3—1

3.1 Aanpak ..... 3—1

3.1.1 Beschrijving van de maatregel ..... 3—1

3.1.2 Schematisatie van de maatregel ..... 3—1

3.1.3 Aanpassing rekenrooster ..... 3—2

3.1.4 Afvoerscenario's ..... 3—5

3.2 Resultaten ..... 3—6

3.2.1 Effect op het morfologische gedrag ..... 3—6

3.2.2 Effect op de bevaarbaarheid ..... 3—10

3.2.3 Effect van afvoerscenario's ..... 3—10

3.3 Discussie ..... 3—17

4 Casestudy B: beheer bij ruimere vaargeul ..... 4—1

4.1 Aanpak ..... 4—1

4.1.1 Modelontwikkeling ..... 4—1

4.1.2 Opzet van de casestudy ..... 4—1

4.1.3 Beoordeling van baggerstrategieën ..... 4—3

4.2 Resultaten ..... 4—3

4.2.1 Variaties in de tijd ..... 4—3

4.2.2 Beheersdoel B150 ..... 4—4

4.2.3 Beheersdoel B170 ..... 4—7

4.2.4 Beheersdoel B152 ..... 4—10

4.3 Discussie ..... 4—10

5 Casestudy C: suppletieproef ..... 5—1

5.1 Aanpak ..... 5—1

5.1.1 Overzicht van berekeningen ..... 5—1

5.1.2 Schematisatie van de maatregel ..... 5—2

5.1.3 Afvoerhydrograaf ..... 5—2

5.1.4 Grootschalige bodemdaling ..... 5—2

5.2 Resultaten van gevoeligheidsberekeningen ..... 5—4

5.2.1 Invloed van de actieve laagdikte ..... 5—4

5.2.2 Invloed van het aantal sedimentfracties ..... 5—8

5.3 Resultaten van suppletieberekeningen ..... 5—12

5.3.1 Effect op ruimtelijke verspreiding van suppletiemateriaal ..... 5—12

5.3.2 Effect op samenstelling van bodemmateriaal ..... 5—18

5.3.3 Effect op bodemligging ..... 5—18

5.3.4 Effectiviteit van een jaarlijkse suppletie op de bodemstabilisatie ..... 5—20

5.3.5 Gevoeligheid voor suppletievolume ..... 5—21

5.3.6 Gevoeligheid voor samenstelling van het suppletiemateriaal .. 5—24

5.3.7 Gevoeligheid voor dikte van actieve laag ..... 5—27

6 Conclusies en aanbevelingen ..... 6—1

6.1 Conclusies ..... 6—1

6.2 Aanbevelingen ..... 6—2

7 Literatuurverwijzingen ..... 7—1

Bijlage

A Karakteristiekenanalyse A–1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Tot eind 2012 is binnen de Directie Oost-Nederland van Rijkswaterstaat het project Toekomstvisie Waal in uitvoering. Dit project valt onder het Meerjarenprogramma Infrastructuur en Transport (MIT) en bestaat uit investeringen in uitwijkhavens, verkeersbegeleiding en vaarwegverruiming. Het doel van de vaarwegverruiming is vaarweggebruikers zekerheid te bieden ten aanzien van een 170 m brede en 2,80 m diepe vaargeul op het traject Rijnmond-Duisburg op langere termijn. Door de bodemontwikkelingen in de Rijntakken worden echter in toenemende mate knelpunten verwacht. In de komende jaren kunnen vaker ondiepten in de vaarweg optreden en kan erosie constructies in de bovenrivieren verder ondermijnen. Met ingrepen in de sedimenthuishouding of lokale stromingscondities kan dit worden voorkomen.

De benodigde vaarwegverruiming zou aanvankelijk worden gerealiseerd met bodemconstructies in de Waalbochten en baggerwerken in de vaargeul (Rijkswaterstaat, 1993). Echter, vanwege twijfel over de effectiviteit van de voorgestelde bodemconstructies (Smedes, 2005) wordt er binnen het bestaande project Toekomstvisie Waal een nieuw uitvoeringsprogramma uitgewerkt in een deelproject Duurzame Vaardiepte Rijndelta (DVR). Dit nieuwe deelproject is min of meer een vervolg op het Grensproject (Baur et al, 2002) en vervangt de deelprojecten Bodemschermen Hulhuizen en Bodemschermen Haalderen. Het nieuwe deelproject richt zich niet alleen op wijzigingen ten opzichte van de voorgestelde bodemschermen, maar ook op langere termijnen en afstemming tussen grotere riviertrajecten. Dat leidt tot vragen over hoe de vaarweg tussen Rotterdam en Duisburg reageert op andere technische maatregelen, verschillende klimaatscenario's en variaties in het beheer.

Het is tegen deze achtergrond dat binnen Duurzame Vaardiepte Rijndelta een instrument wordt ontwikkeld voor voorspelling van morfologische reacties op ingrepen, diagnose van historische trends in vaarwegdimensies en prognose van toekomstige trends. Na voorbereidende studies door Sieben et al (2005), Barneveld & Vermeer (2005) en Mosselman et al (2005), hebben Yossef et al (2006) en Van Vuren et al (2006) een tweedimensionaal morfologisch model gebouwd van de Nederlandse Rijntakken tussen Emmerich (Rhein, km 853), Doesburg (IJssel, km 903), Driel (Nederrijn, km 891) en Woudrichem (Waal, km 953), met daarin de splitsingen Pannerdensche Kop (km 867) en IJsselkop (km 878). Ottevanger & Yossef (2006) hebben het rekenrooster vanaf Woudrichem uitgebreid tot km 976 op de Beneden Merwede en km 979 op de Nieuwe Merwede, met daarin de Merwedesplitsing Kop van de Oude Wiel op km 961.

Het nu beschikbare model is een eerste stap op weg naar een totaalmodel dat ook de Duitse Niederrhein vanaf Duisburg zal omvatten. Het kan desalniettemin nu al worden toegepast voor enkele casestudies. Dat is de achtergrond van de hier gerapporteerde opdracht.

1.2 Opdracht

De opdracht behelst het uitvoeren van drie casestudies om inzicht te verkrijgen in enerzijds de effectiviteit van bepaalde maatregelen in de vaarweg en anderzijds de mogelijkheden van het nieuwe morfologische model. Hiertoe zijn circa 150 modelberekeningen uitgevoerd die elk gemiddeld enkele dagen in beslag namen. De casestudies worden als volgt omschreven:

Casestudy A: langsdammen

Deze maatregel bestaat uit de aanleg van langsdammen tussen km 868 en 920. De hoogte van de langsdammen komt overeen met de waterstand bij gemiddelde afvoer. Bij lagere afvoeren wordt de rivier zo op grote schaal met maximaal 30 m versmald, met opstuwing van de laagwaterstanden als gevolg. De langsdammen worden aangelegd langs oevers met voldoende ruimte tot de vaargeul, dus vooral in binnenbochten. Ze worden gecombineerd met verlaging of verwijdering van de achterliggende kribben om zo de rivier voor hogere afvoeren te verruimen. Deze maatregel zou moeten leiden tot een onveranderde jaarlijkse zandvracht door het traject, beperkte aanzanding in de vaargeul en voldoende afvoercapaciteit bij maatgevende hoogwaters. Een optimaal ontwerp ervan zou een iteratieve benadering vergen, maar deze valt buiten het kader van deze opdracht. Vooralsnog wordt gekozen voor het volgende uitgangspunt. De langsdam is aan bovenstroomse zijde zodanig met een krib verbonden, dat er bij afvoeren kleiner dan gemiddeld geen water achter de langsdam stroomt, en dat bij afvoeren groter dan gemiddeld de nieuwe oevergeul 15% van de hoofdgeulafvoer achter de langsdam afvoert.

Casestudy B: beheer bij ruimere vaargeul

In deze casestudy wordt de verandering in beheer op het traject km 868-950 bepaald die nodig is als de vaargeul wordt verruimd van 150 m × 2,5 m naar 170 m × 2,8 m. Het beheer betreft baggeren en storten en wordt zoveel mogelijk bepaald conform het voorstel van Sieben (2006). Hiervoor wordt de door Yossef et al (2006) ontwikkelde modelfunctionaliteit verder uitgebreid.

Casestudy C: suppletieproef

Suppletie van sediment in erosiegebieden is een van de maatregelen om de voortgaande daling van de rivierbodem een halt toe te roepen. Om meer inzicht te krijgen in de effecten op bodemligging en bodemsamenstelling, bereidt Rijkswaterstaat een veldproef voor die bestaat uit het storten van sediment in de Bovenrijn, met als doel het tegengaan van de bodemdaling op de Bovenrijn en het opstuwen van waterstanden op de vaste laag bij Emmerich. Het sediment zal worden gestort in de rechter buitenbocht tussen km 858 en 861 en de linker buitenbocht tussen km 861 en 864, in een gemiddelde laag van circa 0,1 à 0,3 m over een lengte van 3 km en een breedte van 170 m. Met simulaties wordt het volume en de samenstelling van de suppletie bepaald waarmee waterstanden maximaal en duurzaam kunnen worden opgestuwd zonder overschrijding van de norm van OLR-2,8 m binnen de 170 m brede vaargeul.

Overige activiteiten

Naast de uitvoering van de drie casestudies hebben in het kader van deze opdracht ook andere activiteiten plaatsgevonden. Deze bestaan uit het leveren van een review van de MIT-verkenningennota "Duurzame vaardiepte Rijndelta" en het organiseren van de Duits-Nederlandse *expert meeting* "Modelling of morphology from Duisburg to Rotterdam" op 17 en 18 oktober 2006 te Delft. Deze activiteiten worden verder niet in dit verslag gerapporteerd.

De opdracht is vastgelegd in de overeenkomst RI-4651 betreffende "Casestudies Duurzame Vaardiepte Rijndelta". Het project is bij WL | Delft Hydraulics bekend onder nummer Q4245.00.

1.3 Organisatie

De opdracht is uitgevoerd door Saskia van Vuren, Mohamed Yossef, Willem Ottevanger, Michel Zuijderwijk, Kees Sloff en Erik Mosselman. Laatstgenoemde was tevens de projectleider. Arjan Sieben begeleidde het project vanuit Rijkswaterstaat RIZA.

2 Kalibratie

Het door Yossef et al (2006) en Van Vuren et al (2006) gebouwde tweedimensionale morfologische model van het splitsingspuntengebied was nog niet gekalibreerd. Daardoor traden in de morfologische berekeningen nog forse grootschalige veranderingen op die niet in overeenstemming zijn met de werkelijkheid. Voor een zinvolle uitvoering van de casestudies is daarom een beperkte morfologische kalibratie noodzakelijk. In casestudies A en B wordt gebruik gemaakt van het deelmodel van de Waal. Het deelmodel van de Bovenrijn wordt toegepast in casestudy C. De globale kalibratie is daarom beperkt tot de deelmodellen van de Waal en de Bovenrijn.

2.1 Kalibratie van Waalmodel

2.1.1 Kalibratiegrootheden

De kalibratie van het morfologische gedrag van het zomerbed bestaat uit twee delen:

1. kalibratie van 1D ontwikkeling van het bodemlengteprofiel, en
2. kalibratie van 2D patronen in bodemligging.

Kalibratie van 1D ontwikkeling van het bodemlengteprofiel

In overeenstemming met de kalibratie van het 1D Rijntakkenmodel op basis van Sobek (Van Vuren & Sloff, 2006) is het bodemlengteprofiel in het 2D model van de Waal geijkt aan de hand van het waargenomen bodemgedrag in de periode 1990-2000. De ijking is gericht op de weergave van karakteristieke morfologische parameters die Sieben (2005) heeft afgeleid om de historische ontwikkeling van de Waal te beschrijven. Het gaat bij deze parameters om de trajectgemiddelde profielgemiddelde jaarlijkse bodemveranderingen, de traject-gemiddelde profielgemiddelde bodemhellingen, de voortplantingssnelheden van lokale bodemverstoringen en het jaarlijkse sedimenttransport.

Kalibratie van 2D patronen in bodemligging

Tweedimensionale patronen in bodemligging zijn gekalibreerd op basis van de resultaten van jaarlijkse gebiedsdekkende multibeampeilingen in de periode 2000-2005. De kalibratie is daarbij gericht op de weergave van de dwarshellingen in bochten, de ligging van banken en bochtovergangen en de bodemligging in de omgeving van waterbouwkundige constructies. Uit de peilingen is hiervoor een gemiddelde bodemligging bepaald, omdat de bodem door afvoerfluctuaties en beddingvormen varieert.

2.1.2 Gereedmaken van model voor kalibratie

Hydraulische en morfologische randvoorwaarde

Voor de ijking zijn modelberekeningen uitgevoerd voor een periode van 20 jaar. In het complete DVR-model vindt de informatie- en gegevensuitwisseling tussen de deelmodellen Bovenrijn en Waal *online* op de domeinrand plaats, waardoor op de instroomrand van de Waal geen randvoorwaarden hoefden te worden gedefinieerd. Aangezien het deelmodel van de Waal nu los van de andere deelmodellen wordt gebruikt, zijn op de bovenrand van het Waalmodel een hydraulische en een morfologische randvoorwaarde opgelegd.

De kalibratieberekeningen zijn uitgevoerd met een constante morfologisch karakteristieke afvoer van 1590 m^3/s, welke is afgeleid uit afvoermetingen in de periode 1990-2000. Deze karakteristieke afvoer is zodanig gekozen dat het verwachte totale volume sedimenttransport in de genoemde periode onveranderd blijft.

Als morfologische randvoorwaarde is uitgegaan van een autonome bodemdaling van 2 cm/jaar op de bovenrand van het Waalmodel. Deze bodemdaling is afgeleid uit bodemmetingen in de periode 1990-2000.

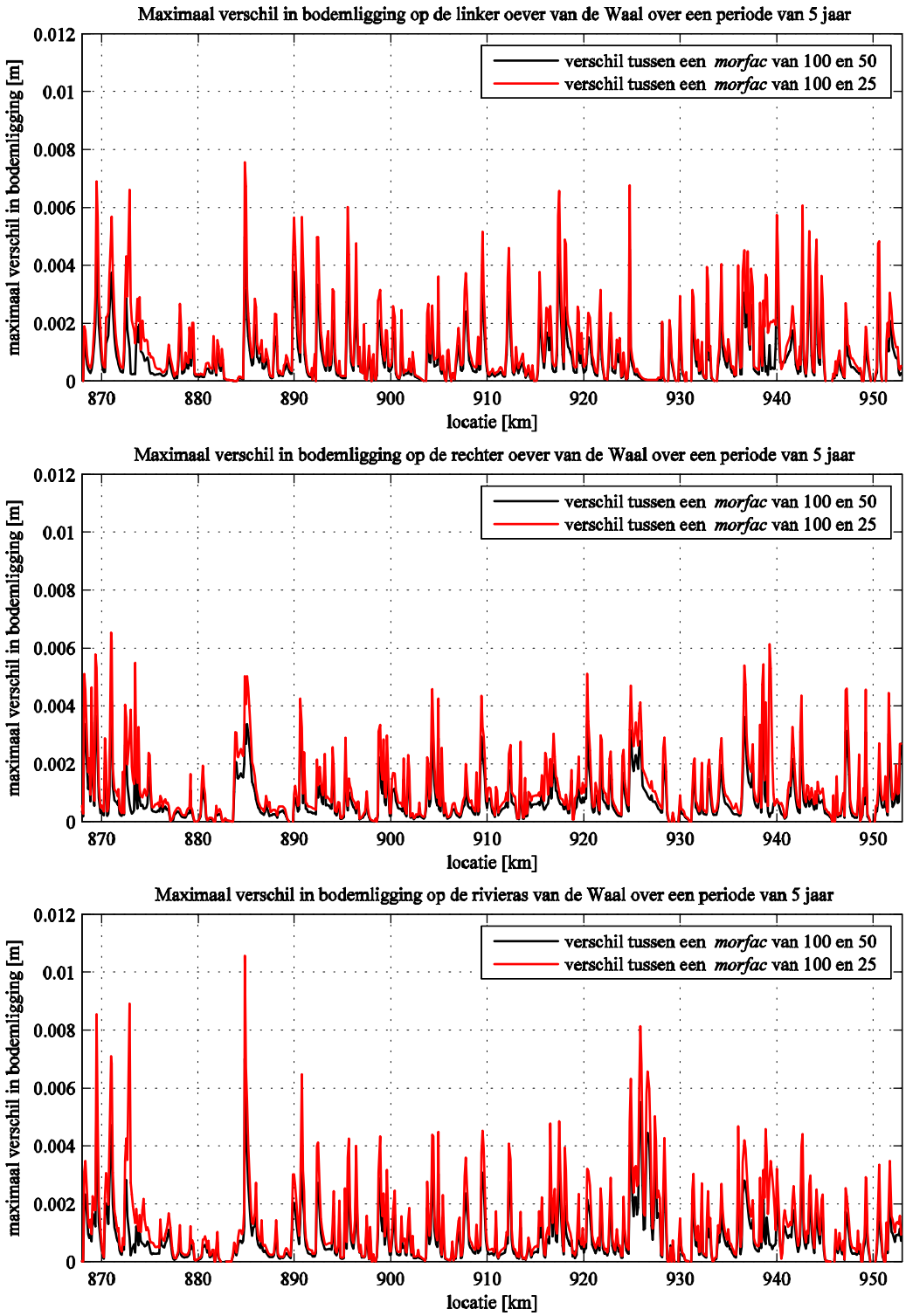
Op de benedenrand in de Waal is ten opzichte van de voorgaande studie een nieuwe waterstand-afvoerrelatie toegepast, die door RIZA is afgeleid uit DONAR-gegevens. De relatie is als volgt:

$$h_{953.2} = \left(\frac{Q_{waal}}{1515}\right)^{0,95} - 0,1 \qquad (2\text{-}1)$$

waarin de index van de waterstand h de rivierkilometer aanduidt en de index van afvoer Q de riviertak.

Morfologische factor

De morfologische factor *morfac* in Delft3D is een parameter die de snelheid van morfologische veranderingen in het model opschaalt. Achterliggende gedachte is dat morfologische veranderingen zich op een veel grotere tijdschaal afspelen dan aanpassingen in het stroombeeld. Door de opschaling worden versnelde morfologische veranderingen op een dynamische manier meegenomen in de hydrodynamische berekening, met een aanzienlijke reductie van de rekentijd als gevolg (cf. Van Vuren et al, 2006). Voorafgaand aan de modelkalibratie zijn enkele testberekeningen uitgevoerd met een constante afvoer van 1590 m^3/s om het effect van verschillende morfologische factoren op de berekende bodemligging te analyseren. Figuur 2-1 geeft voor drie langsprofielen het maximale verschil, over een periode van 5 jaar, tussen enerzijds berekeningen met *morfac* = 100 en anderzijds berekeningen met *morfac* = 25 en *morfac* = 50. De verschillen zijn verwaarloosbaar klein. In het DVR-model wordt daarom een morfologische factor van 100 aangehouden. De kalibratieberekeningen zijn met die waarde van *morfac* uitgevoerd.



Figuur 2-1. Het effect van een andere morfologische factor op de modelresultaten.

Vergroving van rekenrooster ten behoeve van rekentijdreductie

Om het model met niet al te lange rekentijden te kunnen kalibreren, is het rekenrooster in langs- en dwarsrichting met een factor twee vergrofd. Het fijne en het grove rekenrooster zijn te zien in Figuur 2-2.

De rode lijnen in de figuur geven de als overlaten geschematiseerde kribben, zomerkades en obstakels weer, de blauwe lijnen de ondoorlaatbare dammetjes.

Met behulp van versie 3.3 van Baseline is de hydraulische schematisatie van het model opnieuw aangemaakt. Voor de projectie is gebruik gemaakt van de nieuwe basisschematisatie, die ook in het PKB-beoordelingskader wordt toegepast. Dit is een recenter schematisatie dan door Van Vuren et al (2006) voor het DVR-model was toegepast. Vervolgens zijn de bestanden voor de bodemsamenstelling, de vaste lagen (inclusief winterbed en oevers), de randvoorwaarden en de sedimenttransportformules aangemaakt om het model geschikt te maken voor morfologische berekeningen.

Naast de vergroving van het rekenrooster is de rekentijdstap vergroot van 0,4 naar 1,6 minuten.

Figuur 2-3 en Figuur 2-4 tonen de lengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever van de Waal tussen km 910 en 940 na berekeningen voor een periode van 10 jaar met het fijne en het grove rooster. In dwarsrichting valt één roostercel van het grove model samen met twee roostercellen van het fijne model. In de figuren komen twee langsprofielen (cel links en rechts) van het fijne model overeen met één langsprofiel van het grove model.

De met het grove rekenrooster berekende bodemliggingen komen redelijk goed overeen met die van het fijne rooster. De afname in modelresolutie ten gevolge van een grover rooster zorgt er vooral voor dat de overlaten en ondoorlaatbare dammetjes minder gedetailleerd worden weergegeven. De vergroving van het rekenrooster naar een kwart van het aantal cellen en de verviervoudiging van de rekentijdstap reduceren de rekentijd met een factor 13,5. De rekenduur voor een periode van 20 jaar bedraagt met het fijne rooster 165 uur en met het grove rooster 12,2 uur.

2.1.3 Modelinstellingen na kalibratie

Bij de ijking van het 1D gedrag en de morfologische tijdschaal is de kalibratiecoëfficiënt van de sedimenttransportformule vastgesteld. In het model is de transportformule van Meyer-Peter & Müller (1948) toegepast. De snelheid waarmee lokale bodemveranderingen zich voortplanten in benedenstroomse richting is een indicator voor de morfologische tijdschaal van de rivier. De voortplantingssnelheid van bodemverstoringen in het ongekalibreerde model waren meer dan een factor 2 te laag. De kalibratiefactor van de sedimenttransportformule is daarom verhoogd van 0,4 naar 0,9.

De kalibratie van 2D patronen in de ligging van het zomerbed gaf aanleiding tot de volgende modelaanpassingen:

1. *Coëfficiënten in de relatie voor het effect van bodemdwarshellingen op sediment-transport*: Voor de functie $f_s(\theta)$ volgens Struiksma et al (1985) geven Talmon et al (1995) de volgende uitdrukking:

$$f_s(\theta) = 9\left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.3}\sqrt{\theta} = A_{shld}\cdot\theta^{B_{shld}} \qquad (2\text{-}2)$$

Voor de coëfficiënten in deze relatie is genomen A_{shld} = 0,5 en B_{shld} = 0,5.

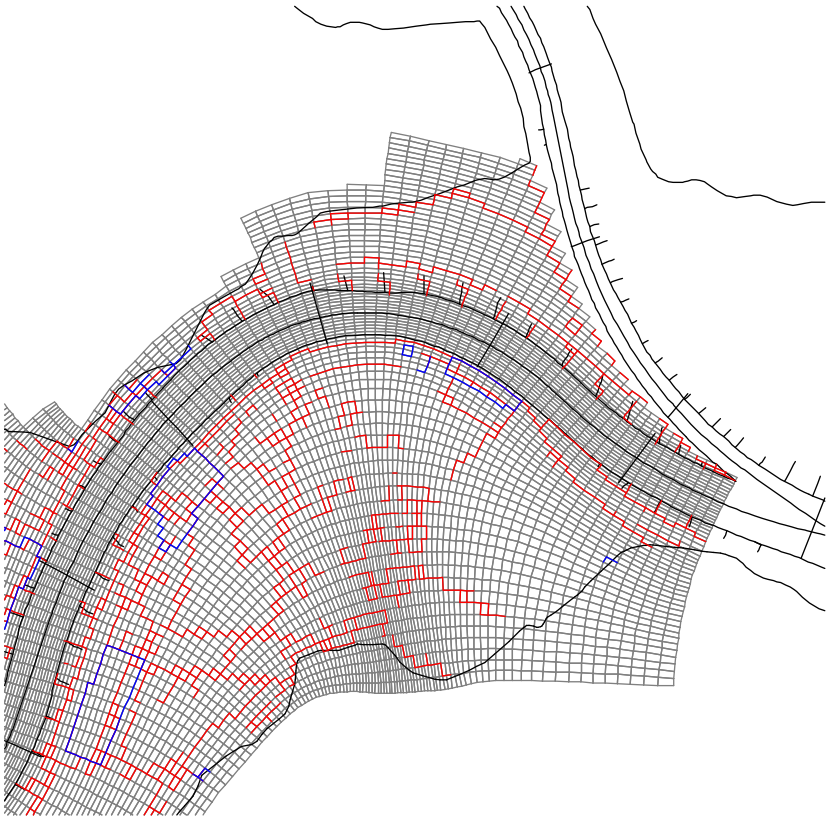
2. *Uitbreiding van de vaste laag die is toegepast in de zone van kribben en kribvakken*: In het ongeijkte model erodeerden de oeverzones initieel sterk door het ontbreken van niet-erodeerbare lagen ter plaatse van de taluds rond de kribkoppen. Om deze erosie te voorkomen is de vaste laag in de zone van kribben en kribvakken uitgebreid met 1 cel uitgebreid in de richting van het zomerbed, en soms wel met 2 cellen, afhankelijk van de locatie van de krib op het rekenrooster.

3. *Vergroving van de korreldiameter in de buitenbocht benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen*: Berekeningen met het ongeijkte model laten zien dat de ontgronding benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen wordt overschat. In werkelijkheid is dit beperkt vanwege uitzeving van sediment en afpleistering van de bodem direct achter de vaste laag. Door het overschatten van de ontgronding wordt de aanzanding op de rechteroever overschat. Dit probleem is verholpen door de korreldiameter benedenstrooms van de vaste laag aan de zijde van de buitenbocht lokaal te vergroven. De korreldiameter in het gekalibreerde model is over het gehele riviertraject constant in dwarsrichting en loopt in langsrichting geleidelijk af van 2,5 mm op de bovenrand naar 0,7 mm op de benedenrand (Van Vuren et al, 2006). Alleen ter plaatse van Nijmegen varieert de korreldiameter in dwarsrichting als gevolg van de toegepaste vergroving, zie Figuur 2-5.

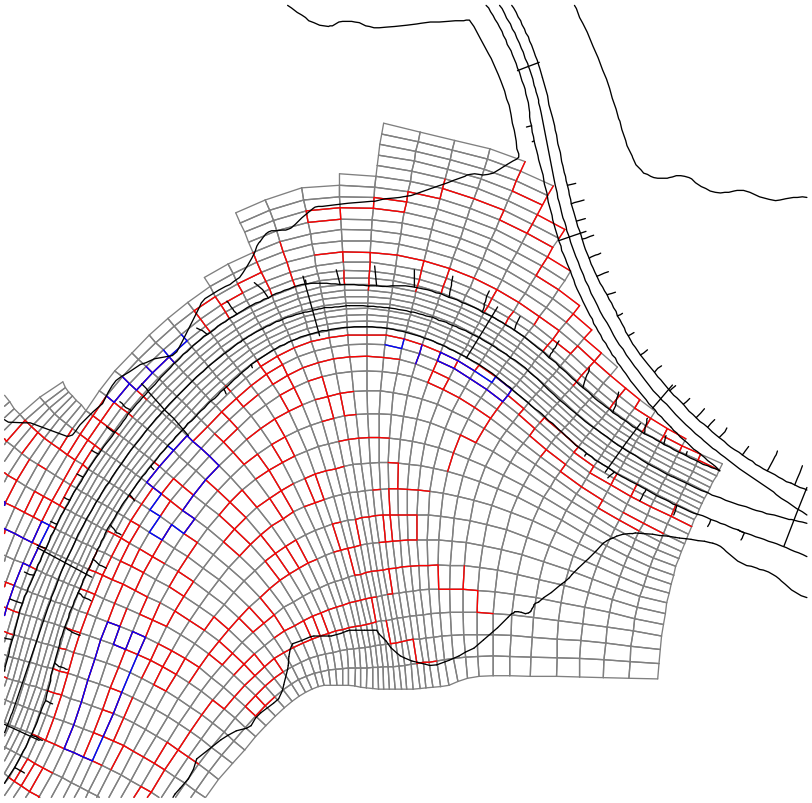
4. *Aanpassingen in de hydraulische ruwheid*: Het ongeijkte model overschat de hoogte van de ondiepte in de binnenbocht bij St. Andries aanzienlijk. Dit probleem is eerder gesignaleerd tijdens een analyse door Yossef (2005) van de bodemligging van het zomerbed bij de Heesseltsche Uiterwaarden. De aanzanding in de binnenbocht is gereduceerd door de hydraulische ruwheid van de vaste laag in de buitenbocht te verhogen. Hiervoor is een Chézycoëfficiënt van 35 $m^{1/2}/s$ gebruikt. Verder zijn in het ongeijkte model brugpijlers gemodelleerd door middel van een plaatselijk verhoogde ruwheid. Deze ruwheid beïnvloedt niet alleen de waterstand, maar ook het sedimenttransport en genereert daarmee onterecht grote bodemveranderingen. De verhoogde ruwheid ter plaatse van brugpijlers is daarom uit het model verwijderd.

5. *Bodemkribben bij Erlecom*: Aangezien de bodemkribben bij Erlecom pas in 1998 zijn gerealiseerd, ontbreken ze in het bodembestand dat met Baseline is gegenereerd. Daardoor ontbreken ze ook in het ongeijkte model. De bodemkribben zijn bij de kalibratie toegevoegd en geschematiseerd als een vaste laag. De hoogte van de vaste laag is gelijk gekozen aan de laagste bodemligging uit de multibeampeilingen in de periode 2000-2005. De bodem in het bodembestand ter plaatse van Erlecom is vervangen door gegevens uit de bodempeiling van 1999.

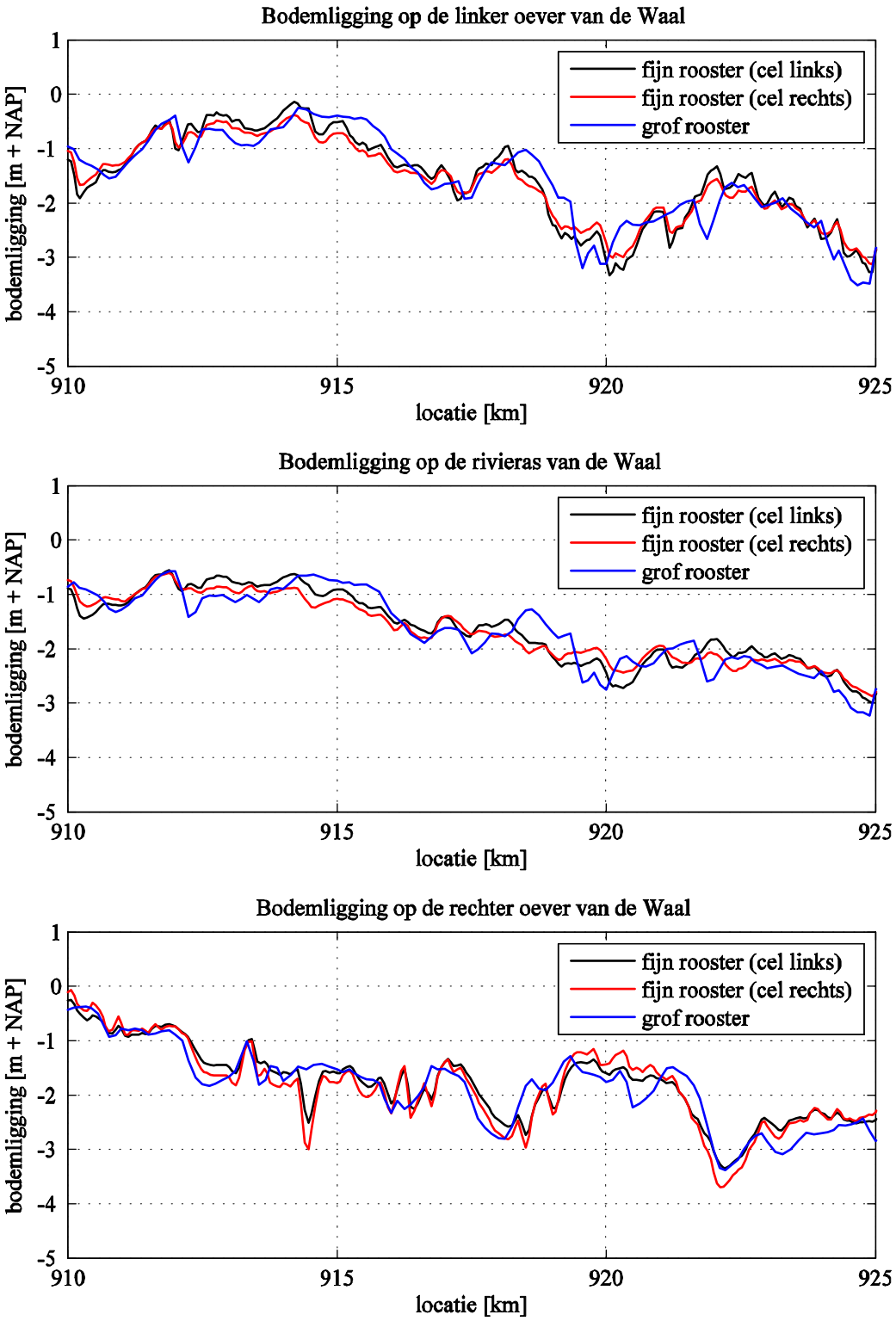
Fijn rekenrooster met overlaten, obstakels en kribben (rode lijnen) en ondoorlaatbare dammetjes (blauwe lijnen)



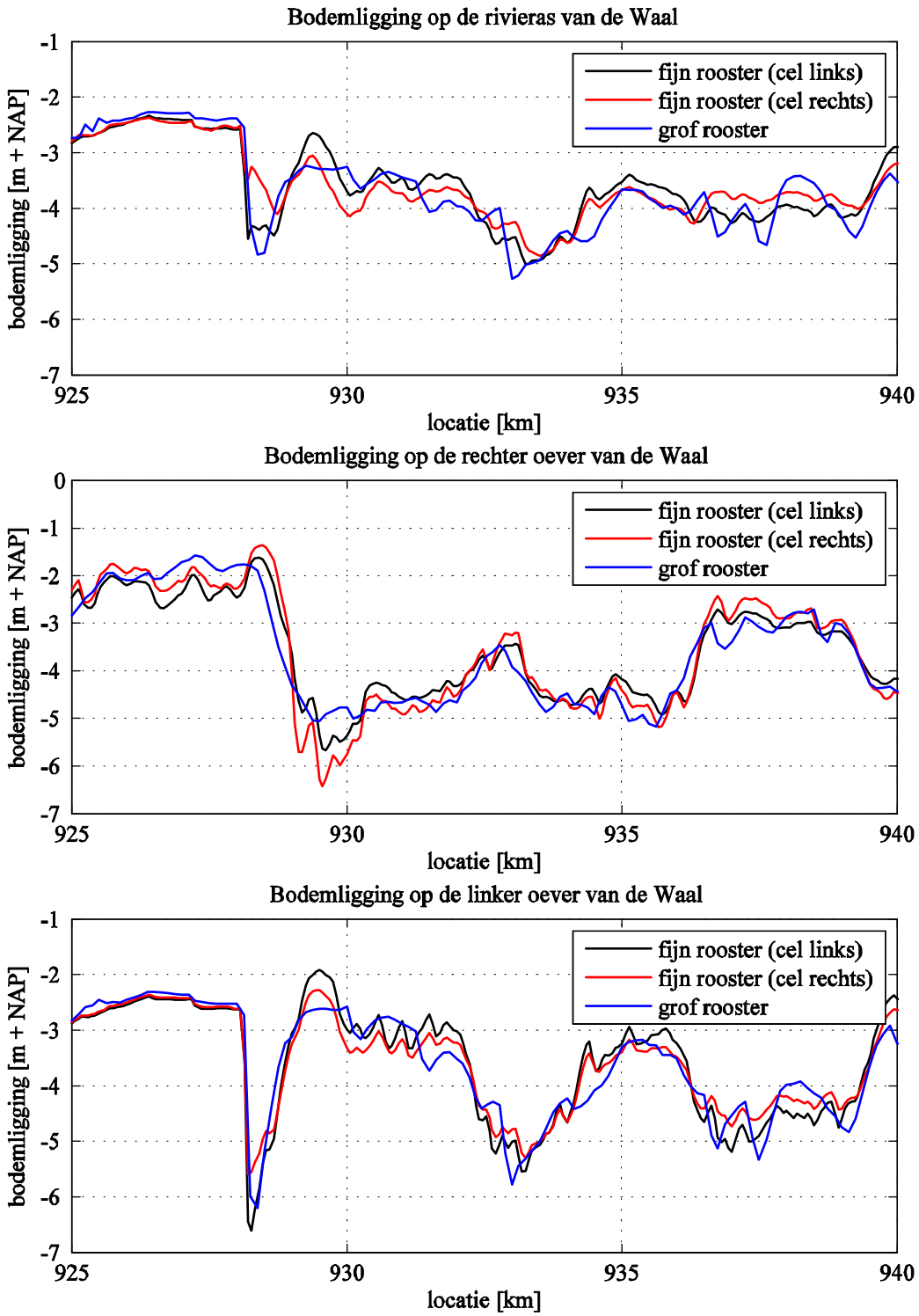
Grof rekenrooster met overlaten, obstakels en kribben (rode lijnen) en ondoorlaatbare dammetjes (blauwe lijnen)



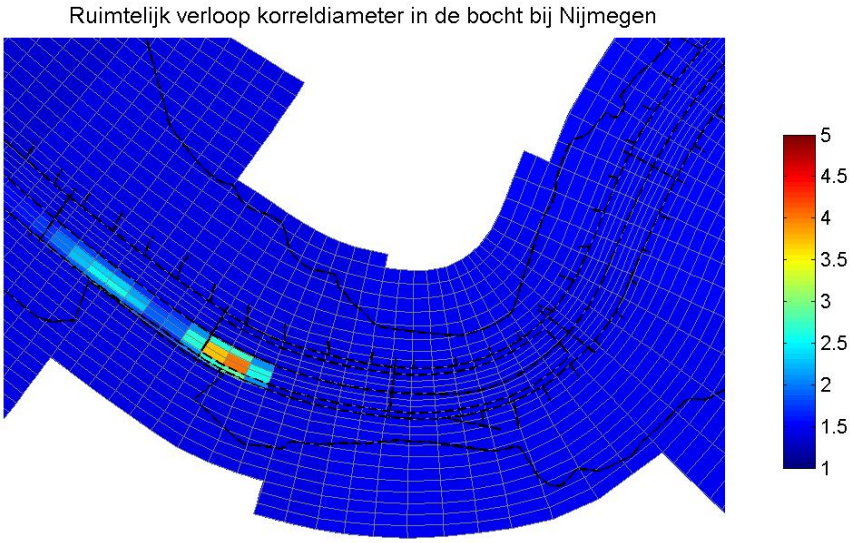
Figuur 2-2. Fijn en grof rekenrooster voor de Boven-Waal.



Figuur 2-3. Bodemlengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever van de Waal op het riviertraject tussen km 910 en 925 voor berekeningen met het fijne en grove rooster, na een periode van 10 jaar.



Figuur 2-4. Bodemlengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever van de Waal op het riviertraject tussen km 925 en 940 voor berekeningen met het fijne en grove rooster, na een periode van 10 jaar.



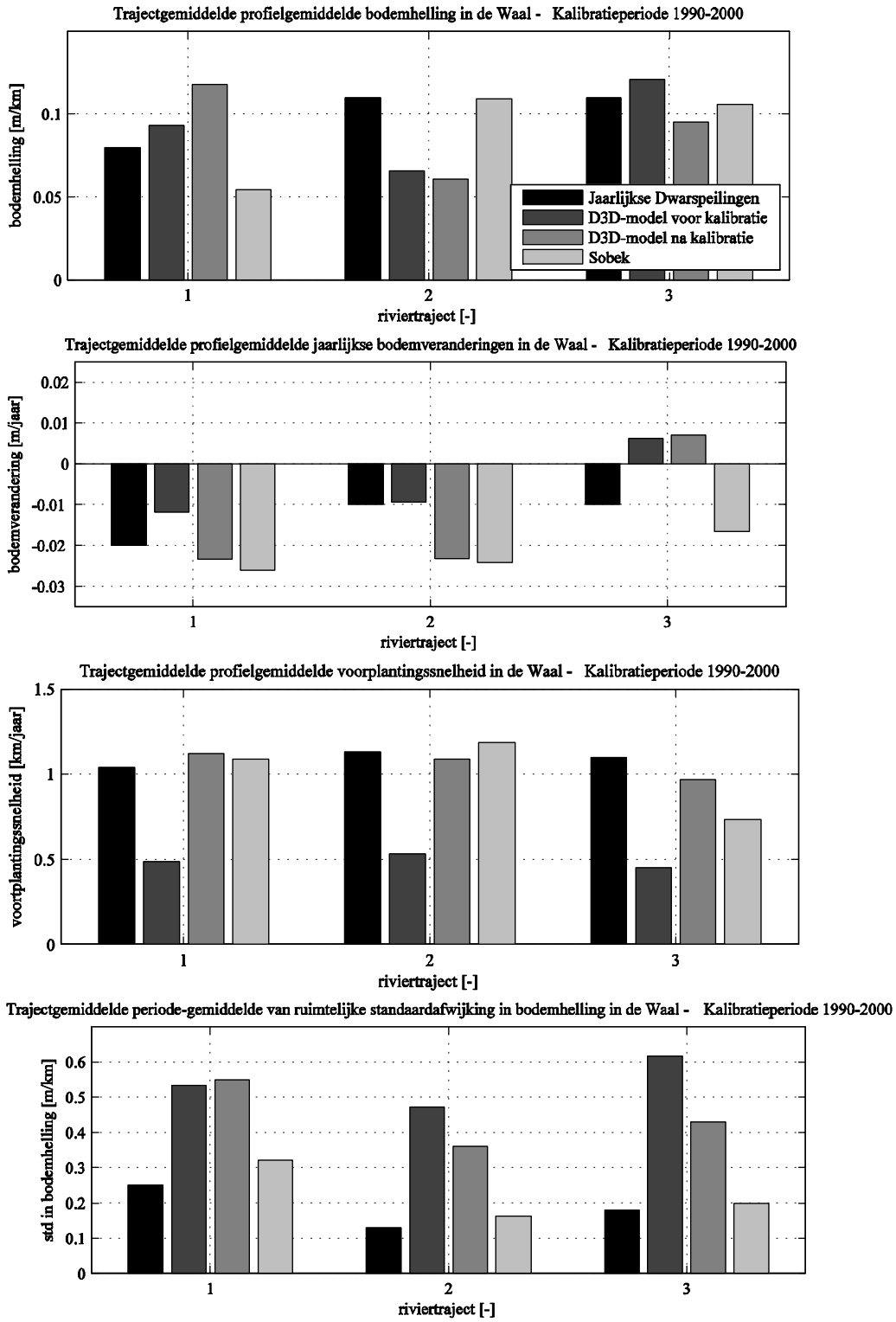
Figuur 2-5. Ruimtelijk verloop van de mediane korreldiameter (mm) ter plaatse van Nijmegen (de gestippelde lijn geeft de locatie van de vaste laag weer).

2.1.4 Resultaten

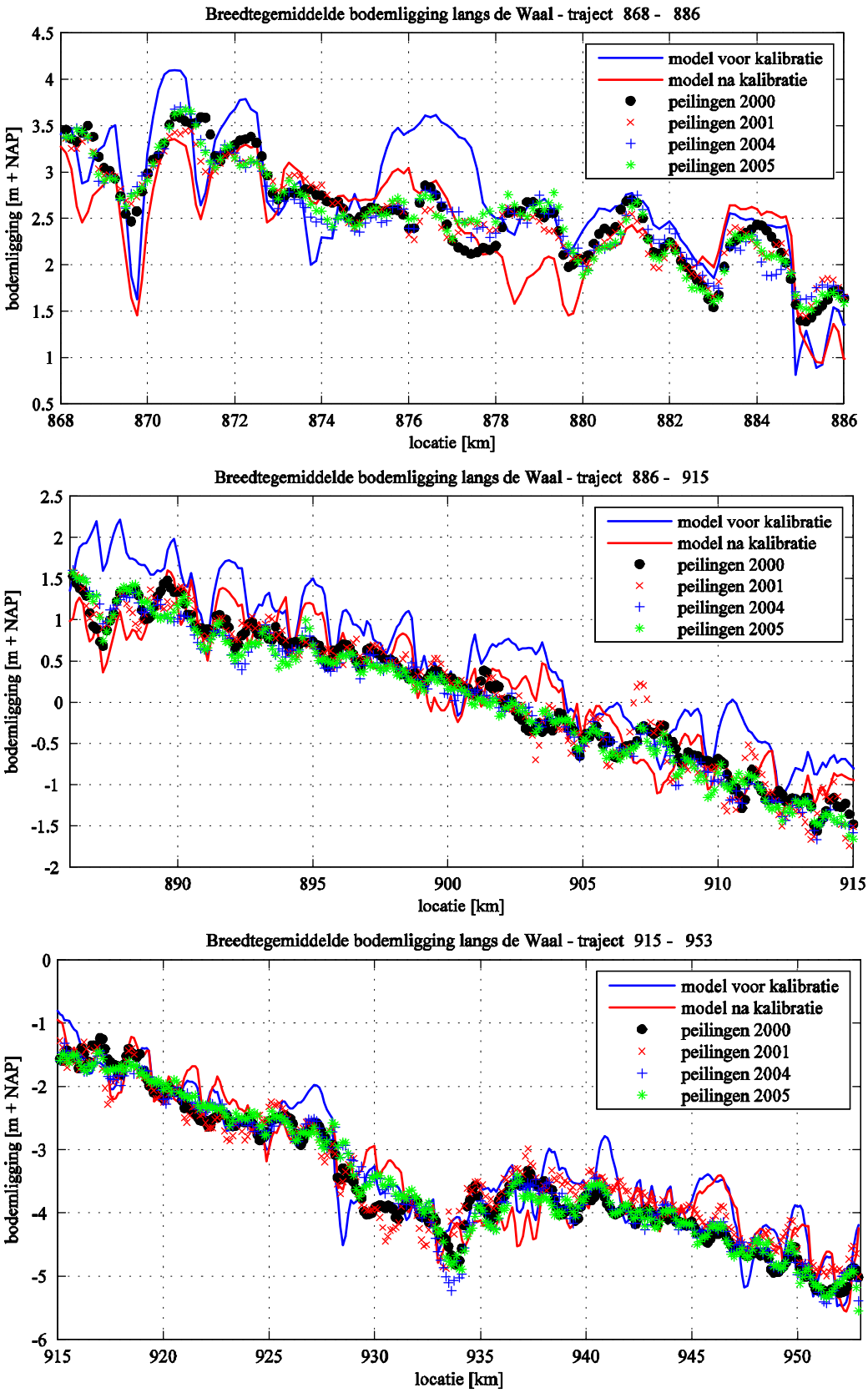
Figuur 2-6 geeft voor de 1D ontwikkeling de grootheden voor en na de kalibratie weer. In de figuur zijn tevens de resultaten opgenomen van het recent hergekalibreerde Rijntakkenmodel in Sobek. In de figuur komt traject 1 overeen met de Boven-Waal (km 868-886), traject 2 met de Midden-Waal (km 887-915) en traject 3 met de Beneden-Waal (km 916-951). De grootste prioriteit is gegeven aan de reproductie van de voortplantingssnelheden van bodemverstoringen en de jaarlijkse bodemveranderingen. De figuur laat zien dat het ongeijkte Delft3D-model juist voor deze morfologische grootheden afwijkt van de waarden uit de jaarlijkse dwarspeilingen. Het ongeijkte model onderschat de snelheid waarmee bodemverstoringen zich voortplanten met een factor twee.

Opvallend is de aanzanding die zowel het geijkte als het ongeijkte model per jaar voorspelt op de Beneden-Waal. In werkelijkheid is op dit 35 km lange traject in de periode 1990-1996 gemiddeld jaarlijks 435.000 m3 sediment aan de rivier onttrokken via onderhouds-baggerwerk (cf. Van Vuren & Sloff, 2006). In het Delft3D-model is geen onderhoudsbaggerwerk opgenomen. Indien het baggervolume over de gehele zomerbedbreedte en over het gehele riviertraject wordt uitgesmeerd, komt dit neer op een onttrekking van 4,5 cm per jaar. Vanuit dit perspectief zou de bodem in de Delft3D-berekeningen zelfs nog meer mogen aanzanden. In het Sobek-model is overigens wel onderhoudsbaggerwerk in het model opgenomen.

De breedte-gemiddelde bodemontwikkeling na een periode van 5 jaar is te zien in Figuur 2-7.



Figuur 2-6. Trajectgemiddelde resultaten van kalibratie van 1D ontwikkeling.



Figuur 2-7. Berekende breedtegemiddelde bodemontwikkeling langs de Waal na een periode van 5 jaar.

De resultaten van de kalibratie van 2D patronen in bodemligging zijn weergegeven in Figuur 2-8 tot en met Figuur 2-10. Voor Boven-Waal, Midden-Waal en Beneden-Waal laten ze de bodemlengteprofielen zien die in het geijkte en het ongeijkte model na 5 jaar ontstaan langs de linkeroever, het midden en de rechteroever. In de figuren zijn ook de multibeampeilingen van 1999, 2000, 2001, 2004 en 2005 opgenomen.

De modelaanpassingen in de kalibratiefase hebben de bodemvoorspellingen op vooral de Midden-Waal maar ook op de Beneden-Waal verbeterd. Op de Boven-Rijn zijn echter nauwelijks verbeteringen gerealiseerd. Op dit traject spelen de gradatie van het sediment en bijbehorende processen als uitzeving een rol in het morfologische gedrag van de rivier, waarvoor in het huidige model geen functionaliteit is opgenomen. Hetzelfde geldt voor de bodemontwikkeling benedenstrooms van de vaste lagen in het model. Figuur 2-7 laat een bodem zien die direct benedenstrooms van de vaste lagen in de bochten bij Erlecom en Nijmegen erodeert. In werkelijkheid beperkt afpleistering van de bodem deze erosie.

2.2 Kalibratie van Bovenrijnmodel

2.2.1 Kalibratiegrootheden

De kalibratie van het morfologische gedrag van het zomerbed bestaat ook voor de Bovenrijn uit twee delen:

1. kalibratie van 1D ontwikkeling van het bodemlengteprofiel, en
2. kalibratie van 2D patronen in bodemligging.

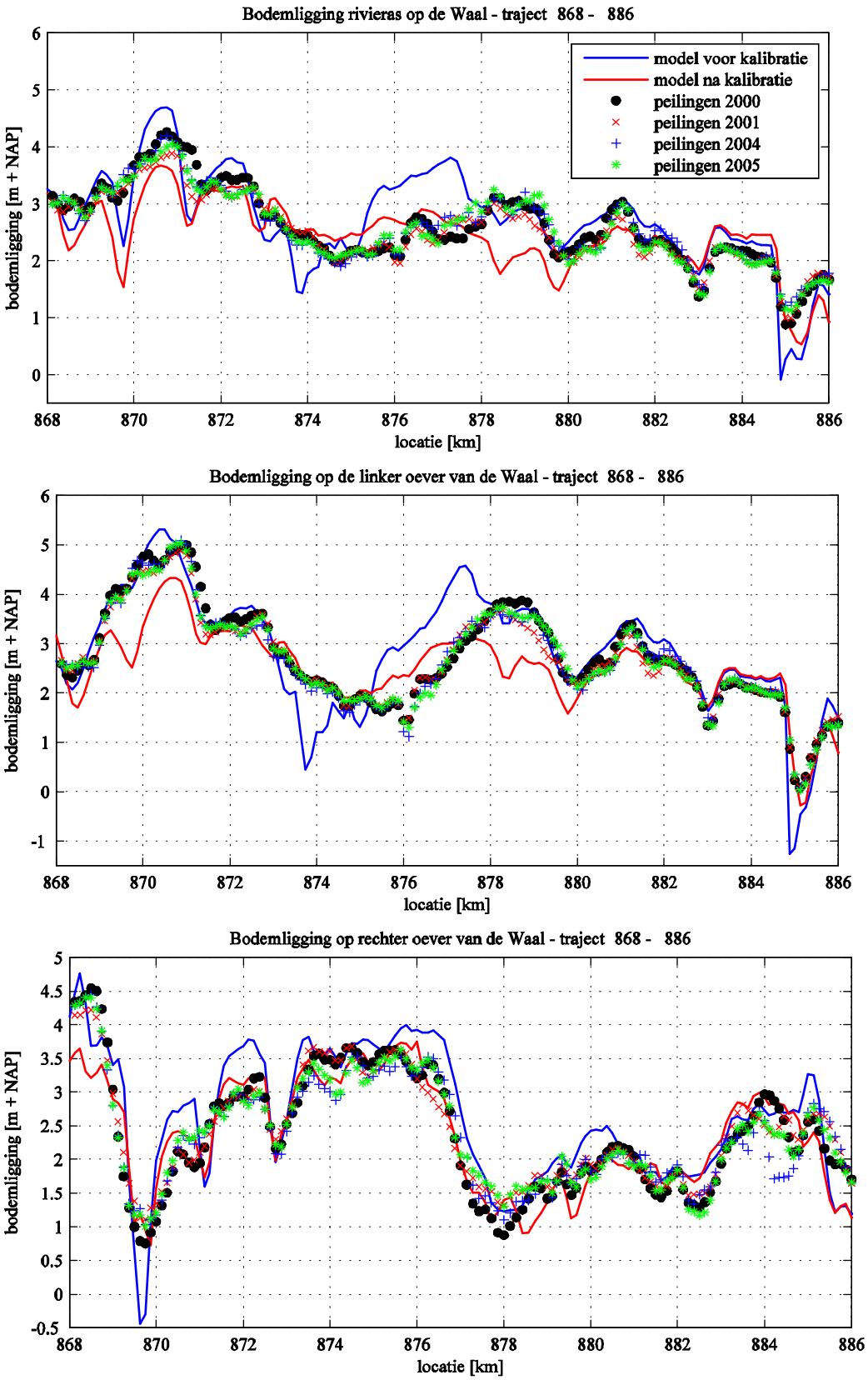
De kalibratie is uitgevoerd op het linux cluster met Delft3D-versie [3.54.13.00.r.01.WO05].

Kalibratie van 1D ontwikkeling van het bodemlengteprofiel

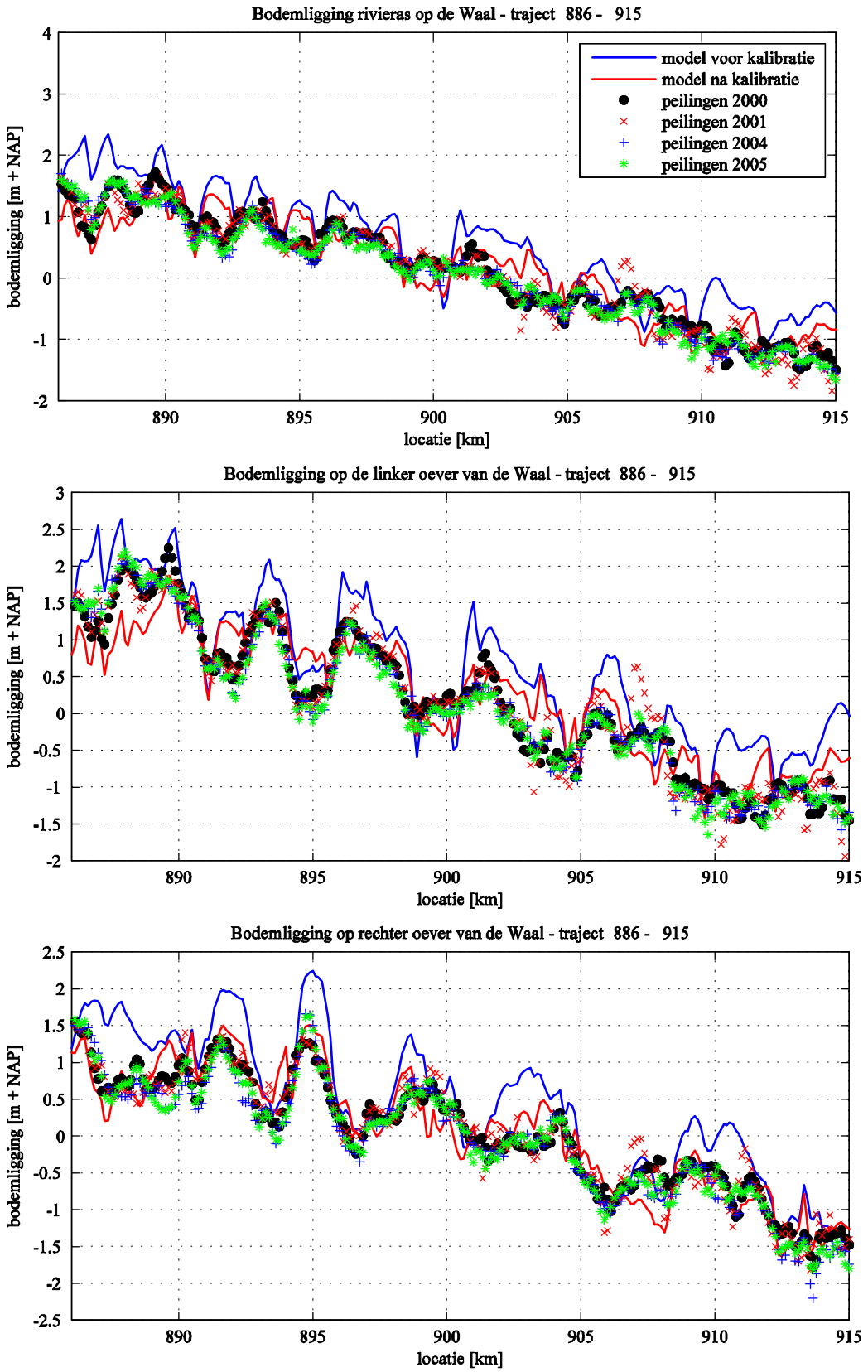
Net als voor de Waal is de 1D ontwikkeling van het bodemlengteprofiel van de Bovenrijn gekalibreerd op basis van de trajectgemiddelde profielgemiddelde jaarlijkse bodem-veranderingen, de voortplantingssnelheden van lokale bodemverstoringen en het jaarlijkse sedimenttransport.

Kalibratie van 2D patronen in bodemligging

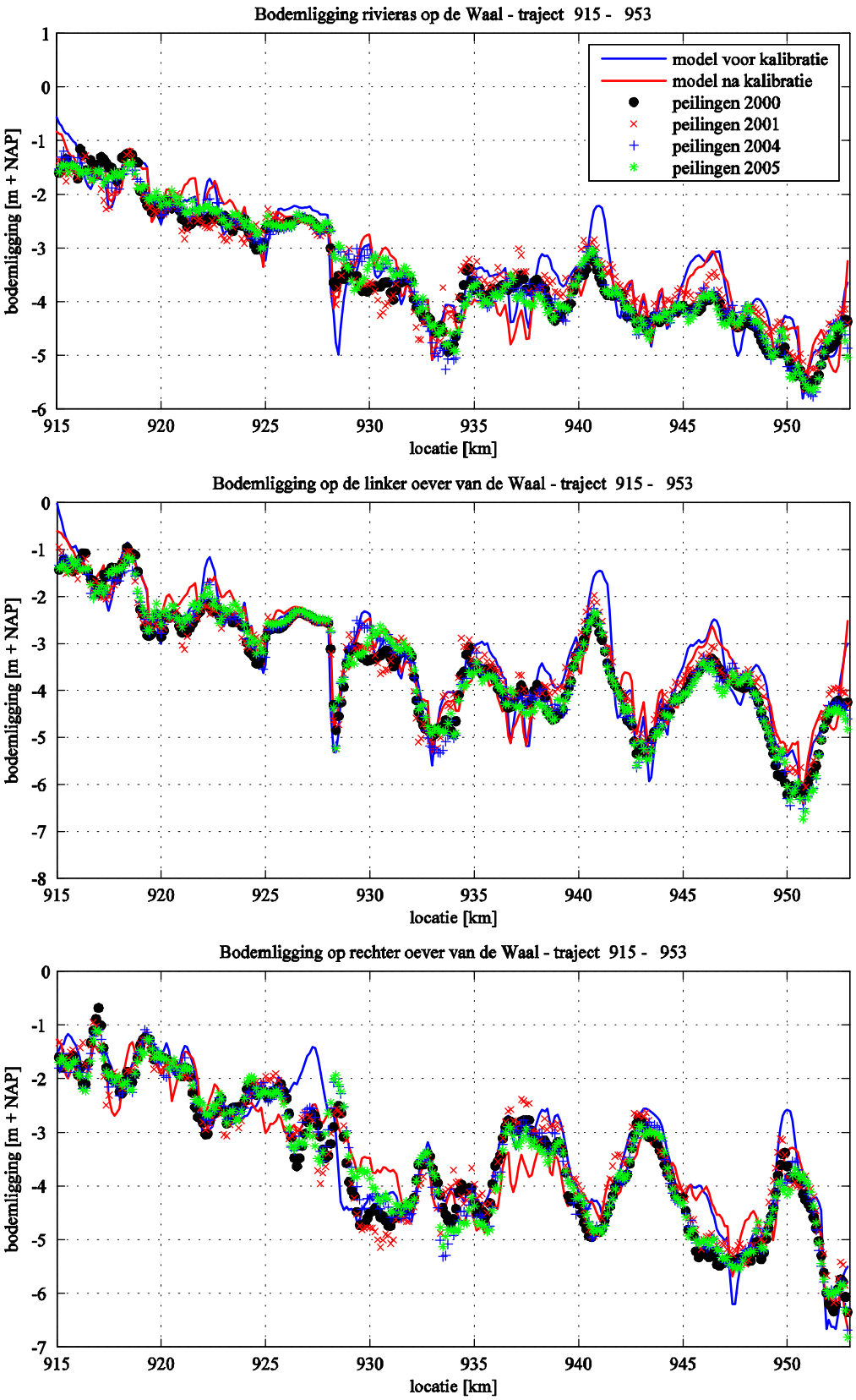
Tweedimensionale patronen in bodemligging zijn gekalibreerd op basis van de resultaten van jaarlijkse gebiedsdekkende multibeampeilingen in de periode 1999-2005. Deze metingen zijn alleen beschikbaar voor het Nederlandse deel van de Bovenrijn, dat wil zeggen vanaf km 857. Net als voor de Waal is de kalibratie van 2D patronen gericht op de weergave van de dwarshellingen in bochten, de ligging van banken en bochtovergangen en de bodemligging in de omgeving van waterbouwkundige constructies.



Figuur 2-8. Berekende bodemliggingen op het traject Boven-Waal voor lengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever na een periode van 5 jaar.



Figuur 2-9. Berekende bodemliggingen op het traject Midden-Waal voor lengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever na een periode van 5 jaar.



Figuur 2-10. Berekende bodemliggingen op het traject Beneden-Waal voor lengteprofielen langs de linkeroever, het midden en de rechteroever na een periode van 5 jaar.

2.2.2 Gereedmaken van model voor kalibratie

Baselineprojectie

Evenals voor de Waal, is voor de Bovenrijn de hydraulische schematisatie met Baseline-versie 3.3 opnieuw aangemaakt. Voor de Baselineprojectie is gebruik gemaakt van de basisschematisatie die ook in het PKB-beoordelingkader wordt toegepast.

Uitbreiding naar gegradeerd sediment

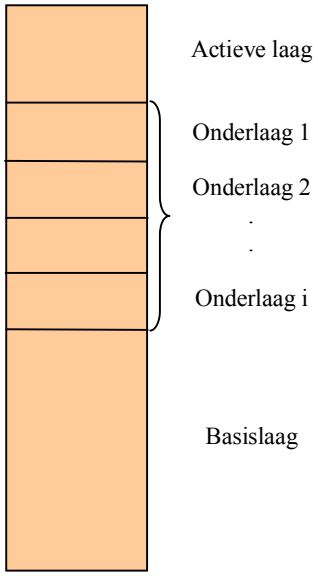
Voor de simulatie van de suppletieproef in de Bovenrijn wordt gebruik gemaakt van de functionaliteit voor gegradeerd sediment. Voorafgaand aan de kalibratie is daarom het deelmodel van de Bovenrijn uitgebreid met gegradeerd-sedimentformuleringen en bodem-samenstellingsgegevens.

Initiële korrelfractieverdeling
Het sediment wordt opgedeeld in een discreet aantal fracties. De initiële korrelfractieverdeling is afkomstig uit het Sobek-Rijntakkenmodel van Sloff (2006). Deze is onder andere geconstrueerd uit metingen van percentielwaarden door de Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hoewel Sloff (2006) met 16 fracties rekent, is het aantal fracties hier gehalveerd tot 8 door enkele fracties samen te voegen en de grofste fracties tussen 32 mm en 128 mm uit het model te verwijderen. Dat laatste is gedaan omdat de twee grofste fracties bij de hoogste afvoer uit de hydrograaf niet in beweging blijken te komen. De in Tabel 2-1 weergegeven verdeling wordt ruimtelijk uniform opgegeven.

Tabel 2-1. Initiële korrelfractieverdeling.

Nummer van fractie	Korrelgrootte (mm)		Percentage (%)
	ondergrens	bovengrens	
1	0,063	0,5	8,8
2	0,5	1	11,3
3	1	2	16,5
4	2	2,8	9,0
5	2,8	4	10,1
6	4	8	19,2
7	8	16	15,2
8	16	32	9,9

Definitie van actieve laag en onderlagen
Er wordt gebruik gemaakt van het lagenconcept van Hirano (1972) waarbij de bodem wordt opgesplitst in een actieve menglaag en een substraat, zie Figuur 2-11. Het substraat is verdeeld in een aantal onderlagen, waarbij de ruimtelijke variërende samenstelling in een boekhoudkundig systeem wordt bijgehouden. Het resterende sediment bevindt zich in de basislaag.



Figuur 2-11. Beschrijving van de ondergrond volgens het 'eenlaagsmodel' van Hirano (1971).

De toplaag is de bovenste laag waarin het bodemtransport optreedt, waarin de duinen zich voortbewegen en waarin de gegradeerd-sedimentprocessen zich voornamelijk afspelen. Deze laag wordt de actieve laag genoemd. De dikte van de actieve laag wordt vaak gerelateerd aan de gemiddelde duinhoogte en is daarmee afhankelijk van de sterkte van de stroming. Toch zijn de berekeningen met het gegradeerd-sedimentmodel van de Bovenrijn uitgevoerd met een constante laagdikte. De actieve laagdikte is een belangrijke kalibratieparameter voor het afregelen van bodemsamenstellingveranderingen.

Er zijn twee onderlagen geschematiseerd met ieder een dikte van 0,5 m. Daaronder bevindt zich de basislaag, waarvan de dikte afhankelijk is van de totale hoeveelheid sediment die per fractie in de *.sdb-bestanden wordt opgegeven.

Blootstellingscorrecties
De sedimenttransporten worden per fractie berekend waarbij de onderlinge beïnvloedingen verdisconteerd worden via blootstellingscorrecties (*hiding-and-exposure corrections*) op de kritieke waarde van de Shieldsparameter voor het begin van sedimentbeweging. Hiervoor wordt de aangepaste Egiazaroff-correctiefunctie volgens Ashida & Michiue (1972) gebruikt. De correctie komt neer op een hogere kritieke Shieldswaarde voor de fijne fracties en een lagere kritieke Shieldswaarde voor de grove fracties.

Hydraulische en morfologische randvoorwaarde

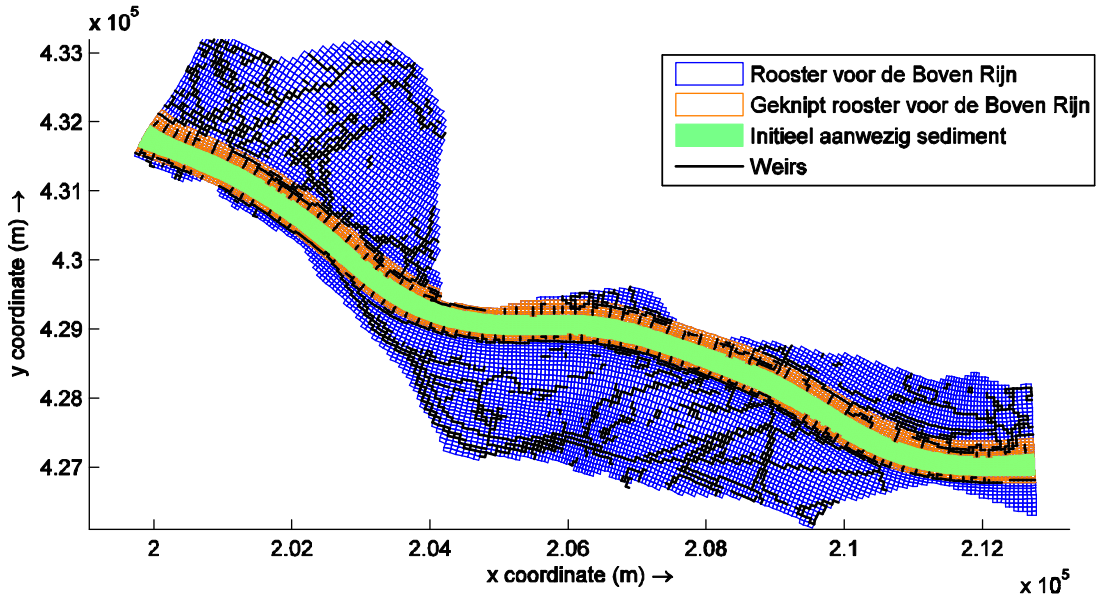
Op de bovenrand wordt een constante afvoer van 2500 m^3/s en een autonome bodemdaling van 2,5 cm/jaar opgelegd. Omdat het deelmodel van de Bovenrijn los van de andere deelmodellen wordt toegepast, wordt ook op de benedenrand een hydraulische voorwaarde gedefinieerd. De autonome bodemdaling bij de Pannerdensche Kop wordt er weergegeven door een waterstandsdaling van 2,5 cm/jaar, beginnend bij 9,7 m + NAP.

Morfologische factor

Aangezien een model met gegradeerd sediment sneller instabiel kan worden dan een model met uniform sediment, zijn de kalibratieberekeningen met een lagere morfologische factor uitgevoerd dan bij de Waal. De morfologische factor is gelijk genomen aan 10.

Rekentijdreductie

Berekeningen met het gegradeerd-sedimentmodel blijken zeer tijdrovend. Aangezien de uiterwaarden bij een afvoer van 2500 m^3/s niet meestromen is de rekentijd gereduceerd door de uiterwaarden uit het model te verwijderen. Het versmalde rekenrooster beslaat het zomerbed, de kribben en de oeverzones. Figuur 2-12 geeft het versmalde rekenrooster weer. Een simulatie voor een periode van 5 jaar met het versmalde model neemt 24 uur rekentijd in beslag. De halvering van het aantal sedimentfracties en de beperking tot twee onderlagen hebben eveneens een beperking van de rekentijd tot achtergrond.



Figuur 2-12. Het originele en het versmalde rekenrooster van de Bovenrijn.

2.2.3 Modelinstellingen na kalibratie

Het sedimenttransport in het model wordt per fractie berekend met de sediment-transportformule van Meyer-Peter & Müller (1948) met een tot 0,025 verlaagde kritieke waarde voor de Shieldsparameter. Uit studies door Van der Werf (2001), Sloff (1998) en Sloff (2006) blijkt het verlagen van de kritieke Shieldswaarde essentieel voor een goede simulatie van het transport van gegradeerd sediment op de Niederrhein en de Bovenrijn. De voornaamste kalibratieparameter voor de ijking van het 1D gedrag en de morfologische tijdschaal is vervolgens de kalibratiecoëfficiënt van de sedimenttransportformule.

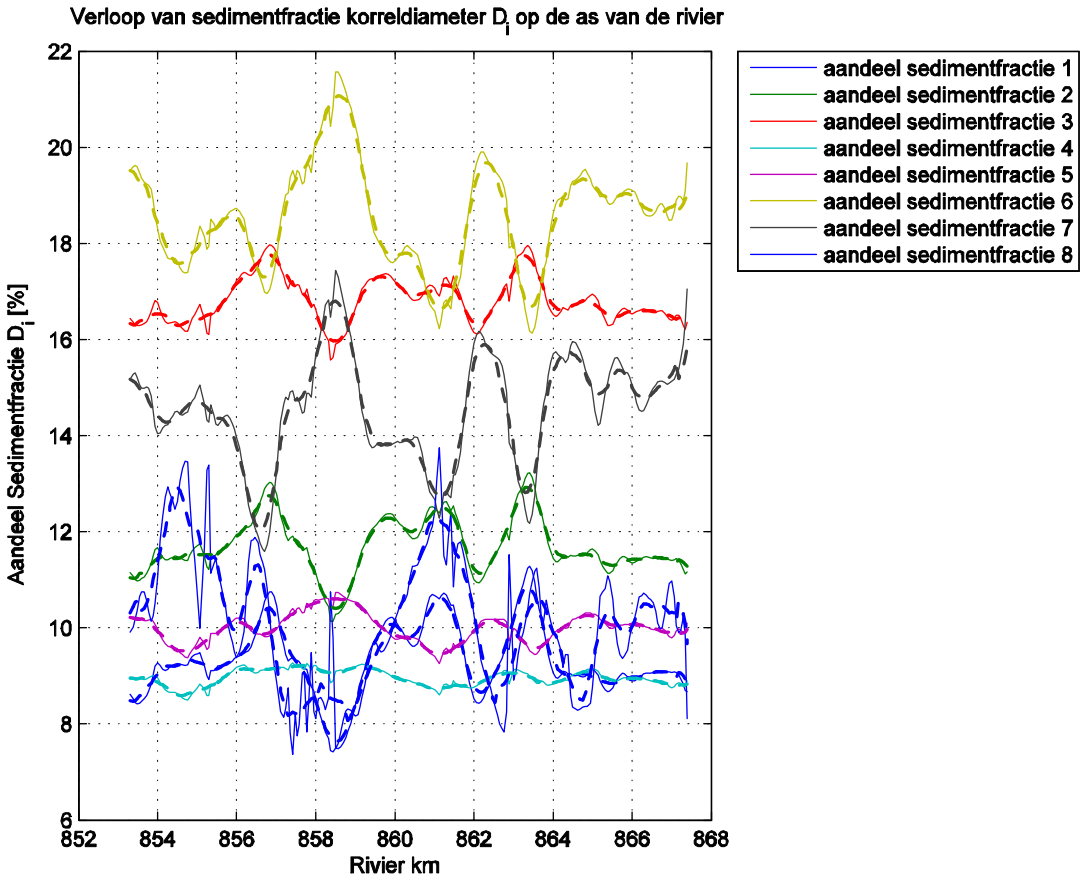
Door deze te verlagen van 6,4 naar 2 werd de voortplantingssnelheid van bodemverstoringen bij benadering gelijk aan 1 km/jaar en kwamen de jaartransporten overeen met de waarden die zijn gehanteerd door Ten Brinke & Gölz (2001) en in het Grensproject (Baur & Jagers, 2002). Baur & Jagers (2002) veronderstellen dat naast bodemtransport een derde deel van het zwevend transport bijdraagt aan de morfologische ontwikkeling. In Tabel 2-2 zijn deze transporten voor drie locaties weergegeven.

Tabel 2-2. Jaarlijks sedimenttransport in de Bovenrijn, afgeleid uit data van BfG en RIZA, zie Baur & Jagers (2002) en Ten Brinke & Gölz (2001).

Type	**Jaarlijks sedimenttransport [$\cdot 10^3$ m^3/jaar]**		
	Grieth km 845	**Griethausen km 857**	**Lobith km 862**
bodemtransport	154	174	142
zwevend transport	314	333	313
bodemmateriaal-transport dat bijdraagt aan morfologische activiteit	258	285	247
totaaltransport	468[1]	507[1]	570[2]

[1] totaaltransport zonder spoeltransport
[2] totaaltransport inclusief spoeltransport

Het 1D gedrag is ook gekalibreerd door variatie van de samenstelling van het bodemmateriaal in langsrichting. Aanvankelijk is de sedimentverdeling ruimtelijk uniform opgegeven. Na een inspeeltijd van 1 jaar ontstaat er al een redelijk ingespeeld ruimtelijk variërende korrelfractieverdeling. Deze samenstelling is als uitgangspunt voor de kalibratie gebruikt. Na een periode van 5 jaar heeft de samenstelling min of meer een evenwicht bereikt. Figuur 2-13 toont de ruimtelijk variërende korrelfractieverdeling na een periode van 5 jaar.



Figuur 2-13. Ruimtelijk variërende korrelfractieverdeling na een periode van 5 jaar.

De ijking van 2D patronen in bodemligging resulteerde in de volgende aanpassingen van het model:

De kalibratie van 2D patronen in de ligging van het zomerbed gaf aanleiding tot de volgende modelaanpassingen:

1. *Coëfficiënten in de relaties voor de effecten van bodemdwarshellingen en spiraalstroom*: In vergelijking (2-2) voor het effect van bodemdwarshellingen is genomen A_{shld} = 0,9 en B_{shld} = 0,5. Verder is voor de spiraalstroming E_{spir} = 1 gekozen.

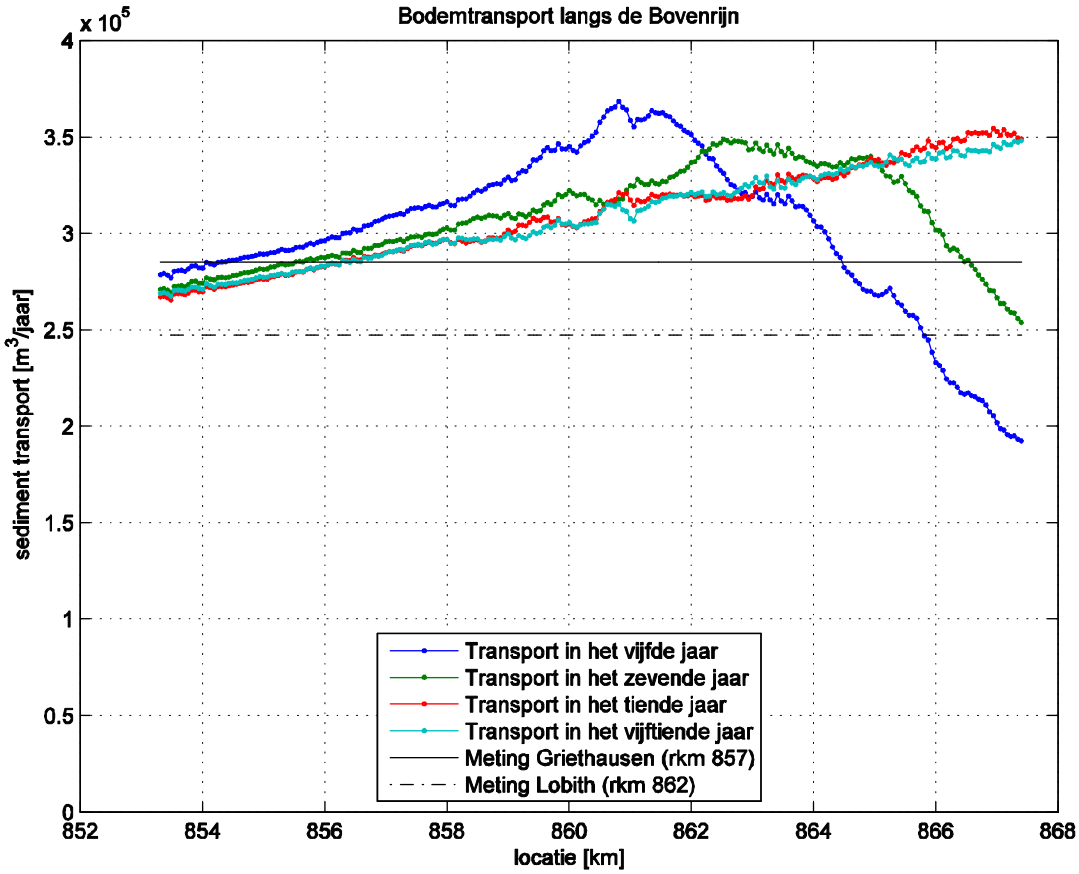
2. *Uitbreiding van de vaste laag die is toegepast in de zone van kribben en kribvakken*: In het ongeijkte model erodeerden de oeverzones initieel sterk door het ontbreken van niet-erodeerbare lagen ter plaatse van de taluds rond de kribkoppen. Om deze erosie te voorkomen is net als bij de Waal de vaste laag in de zone van kribben en kribvakken uitgebreid met 1 cel in de richting van het zomerbed, en soms wel met 2 cellen, afhankelijk van de locatie van de krib op het rekenrooster.

3. *Correctie van massafout in Delft3D-code*: Bij het rekenen met meerdere fracties in combinatie met vaste lagen kan het gebeuren dat een kleine hoeveelheid sediment in een roostercel op de vaste laag komt te liggen. Als vervolgens voor deze roostercel het bodemtransport werd berekend, was de hoeveelheid aanwezig sediment niet voldoende om aan de transportcapaciteit te voldoen. Het bodemtransport was in Delft3D zo geïmplementeerd dat dan sediment geleend werd van de vaste laag, met ter plaatse een massafout als gevolg. Veelvuldige herhaling van dit proces resulteerde in een massafout van 2 tot 3 meter na een periode van 5 tot 10 jaar. Om dit probleem op te lossen is de code van Delft3D aangepast. Het lenen van sediment wordt pas een tweede keer toegestaan als het eerder geleende sediment weer is teruggebracht. De massafout is hierdoor verwaarloosbaar klein geworden (<< 0,1 mm).

4. *Effectieve transportlaagdikte* δ_{eff}: De effectieve transportlaagdikte is zodanig ingesteld dat bodemsamenstellingsveranderingen zich tijdens hoge afvoeren niet te snel voortplanten. Dit resulteert in een vrij grote laagdikte van 1,5 m (cf. Sloff, 2006). Dit stemt overeen met eerdere modelervaringen en een inzicht op fysische gronden dat de actieve-laagdikte bij gemiddelde afvoeren inderdaad groter moet zijn dan de gemiddelde duinhoogte. Bij lage afvoeren heeft een grote laagdikte als consequentie dat de samenstelling zich niet aanpast aan laagwatercondities en dat de bodem geen afpleistering ondergaat. Door een variabele laagdikte toe te passen kan dit probleem in de toekomst voorkomen worden.

2.2.4 Resultaten

Het model is gedurende een simulatieperiode van 5-10 jaar ingespeeld. Figuur 2-14 laat het verloop van het bodemtransport langs de Bovenrijn zien als functie van de tijd. De bodem in het benedenstroomse traject zandt initieel aan tot het sedimenttransport langs de rivier over het gehele traject een stijgend verloop laat zien. De zwarte lijnen geven het jaarlijkse transport van bodemmateriaal weer bij Griethausen (km 857) en Lobith (km 862) volgens de van BfG en RIZA afkomstige gegevens in Tabel 2-2 (Baur & Jagers, 2002; Ten Brinke & Gölz, 2001).

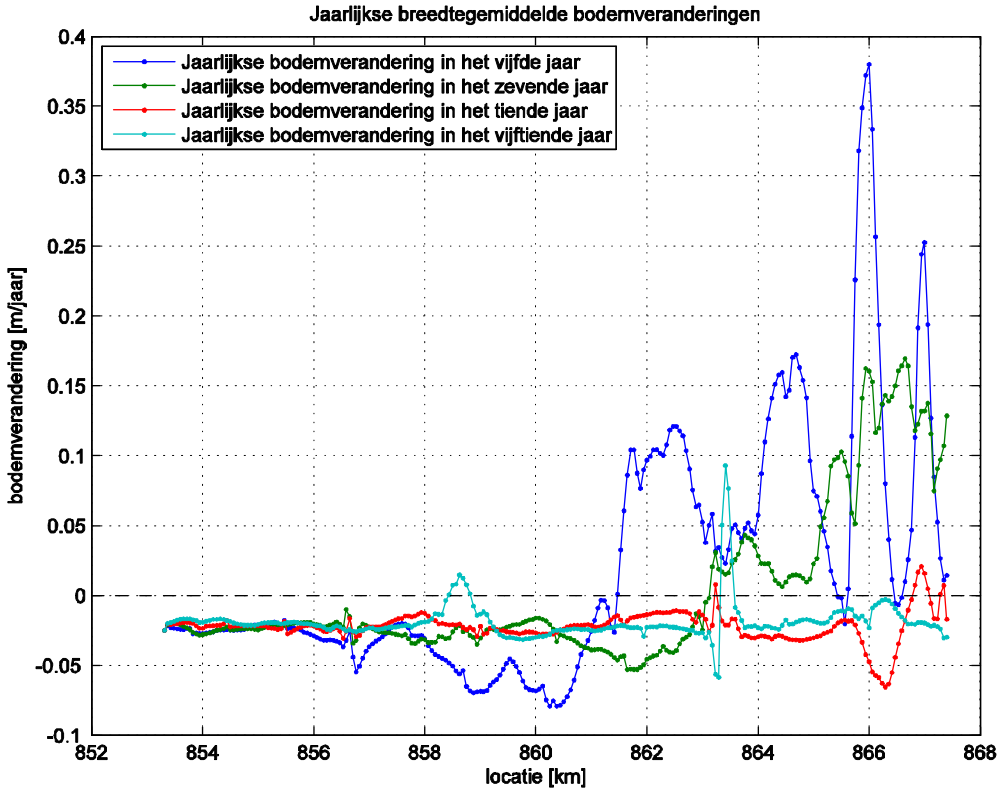


Figuur 2-14. Aanpassing van het verloop van het sedimenttranport langs de rivier in de tijd.

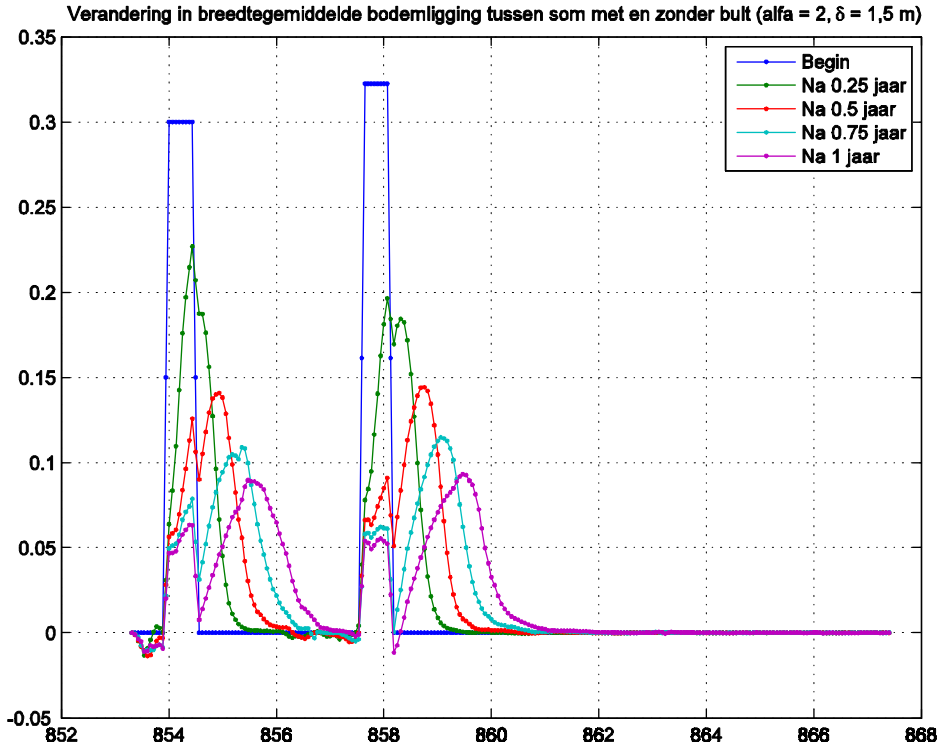
In Figuur 2-15 is te zien dat na een periode van 8 tot 10 jaar de bodemdaling over het gehele riviertraject min of meer constant wordt. De bodem in het model daalt dan jaarlijks met ongeveer 2 à 3 cm. Dit gedrag komt overeen met de bodemdaling van gemiddeld 3 cm/jaar die Sieben (2005) heeft afgeleid uit jaarlijkse dwarspeilingen in de periode 1973-2000.

Sieben (2005) heeft verder uit de jaarlijkse dwarspeilingen in de periode 1973-2000 afgeleid dat de voortplantingssnelheid van bodemverstoringen ongeveer gelijk is aan 1,2 km/jaar. Deze snelheid is als richtlijn gebruikt voor de kalibratie. Aan de hand van de voortplanting van twee sedimentbulten is de vermenigvuldigingsfactor van de sedimenttransportformule afgeregeld op een snelheid van ruim 1 km/jaar. Figuur 2-16 geeft de voortplanting van de bulten weer voor een periode van een jaar.

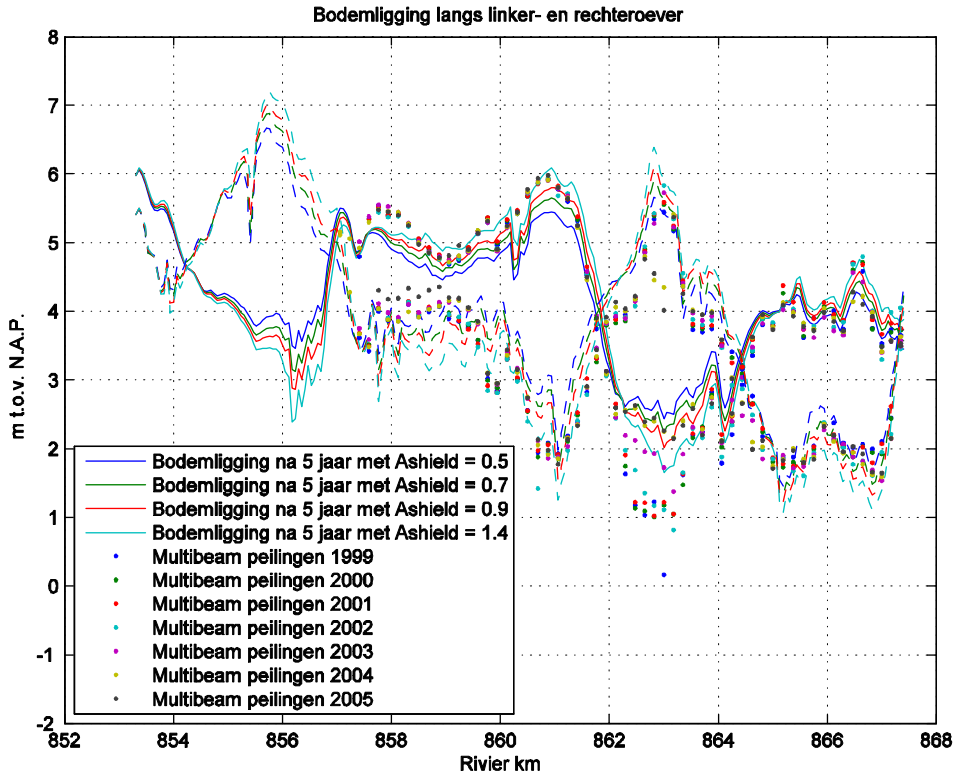
Voor de kalibratie van 2D patronen in bodemligging geeft Figuur 2-17 voor A_{shld}-waarden tussen 0,5 en 1,4 de berekende bodemlengteprofielen weer langs linker- en rechteroever na een periode van 5 jaar. De berekende en gemeten hoogteverschillen tussen de bodems langs de linkeroever en de rechteroever zijn weergegeven in Figuur 2-18. Deze vormen een indicatie voor de dwarshellingen in bochten. Op basis van Figuur 2-17 en Figuur 2-18 is geconcludeerd de combinatie van A_{shld} = 0,9 en E_{spir} = 1,0 resulteert in een goede weergave van de banken en de ligging van bochtovergangen. Figuur 2-19 en Figuur 2-20 laten zien dat deze waarden ook bij de vier in Casestudy C toegepaste afvoeren goed voldoen.



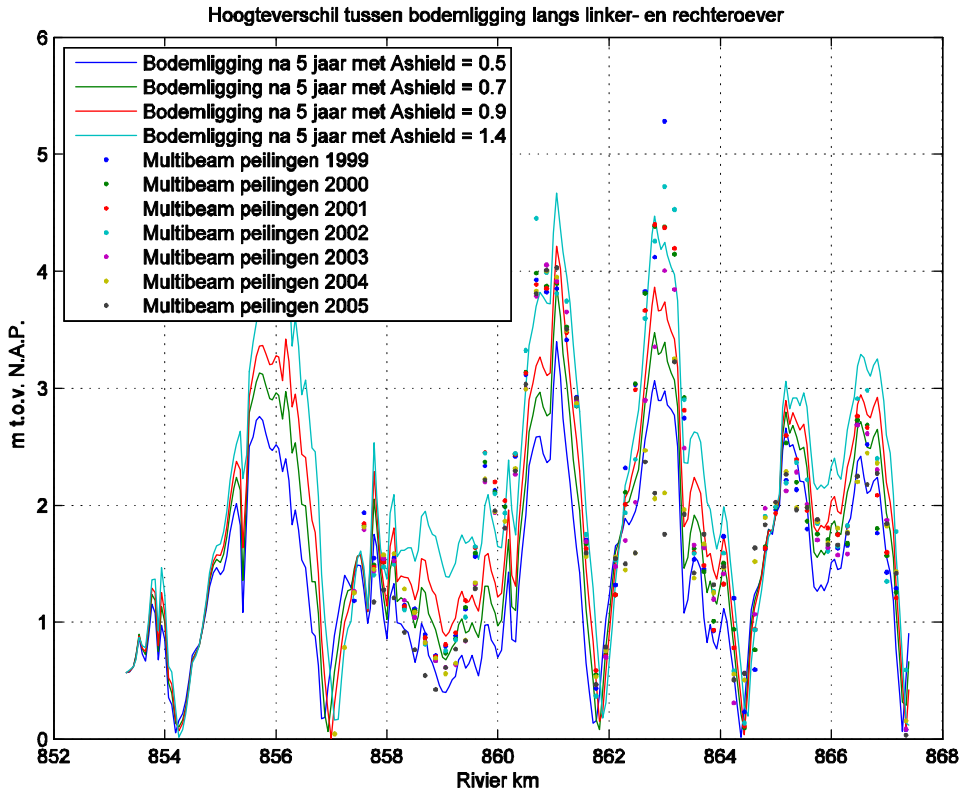
Figuur 2-15. Verloop van jaarlijkse bodemveranderingen langs de rivier als functie van tijd.



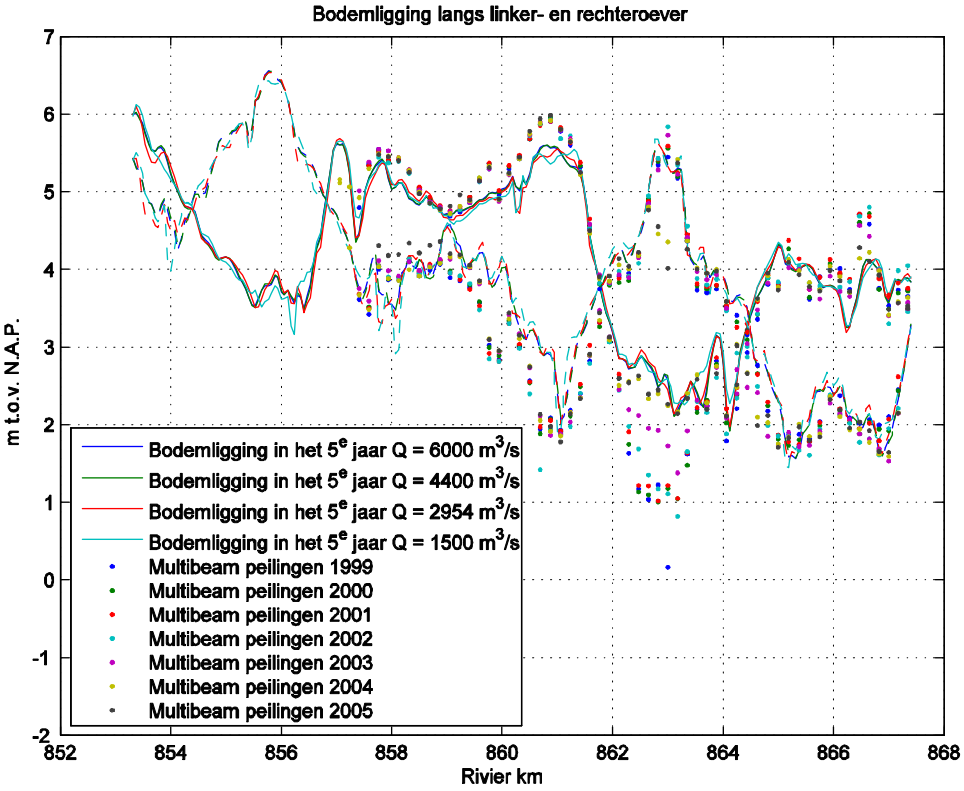
Figuur 2-16. Voorplanting van twee sedimentbulten over een periode van 1 jaar.



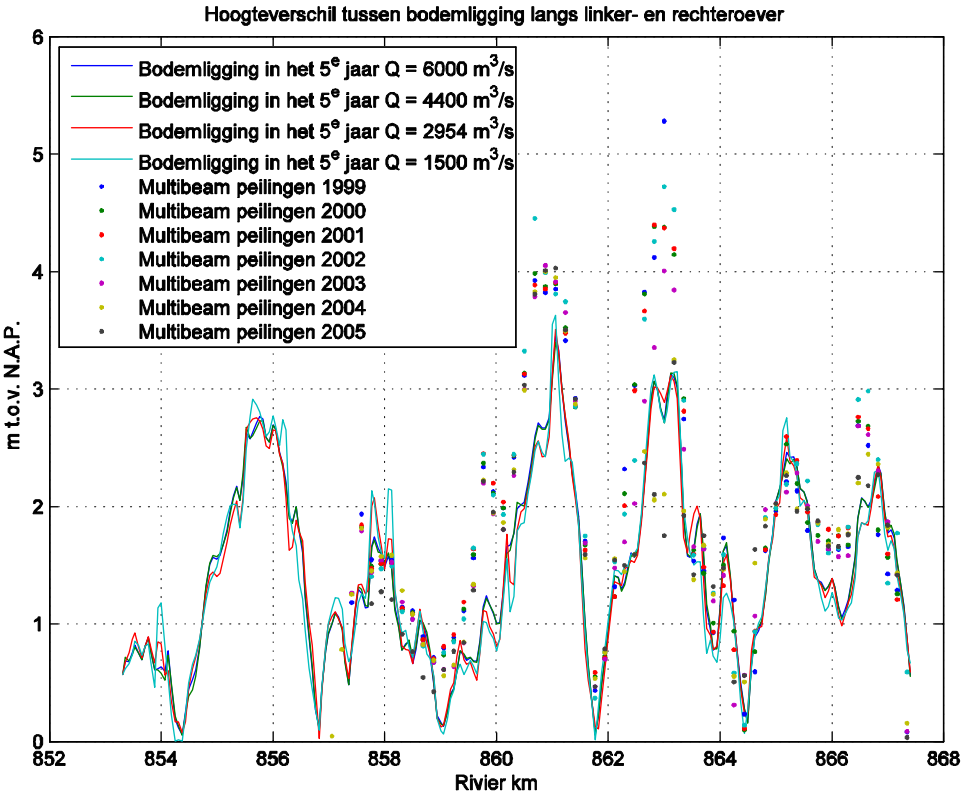
Figuur 2-17. Berekende bodemliggingen langs linker- en rechteroever na een periode van 5 jaar voor vier waarden van A_{shld} en multibeampeilingen in de periode 1999-2005.



Figuur 2-18. Hoogteverschil tussen bodemliggingen op linker- en rechteroever voor berekeningen met verschillende waarden van A_{shld} en multibeammetingen in de periode 1999-2005.



Figuur 2-19. Berekende bodemliggingen langs linker- en rechteroever na een periode van 5 jaar voor vier afvoerniveaus en multibeampeilingen in de periode 1999-2000.



Figuur 2-20. Hoogteverschil tussen bodemliggingen op linker- en rechteroever na een periode van 5 jaar voor berekeningen met vier afvoerniveaus en multibeammetingen in de periode 1999-2005.

3 Casestudy A: langsdammen

3.1 Aanpak

3.1.1 Beschrijving van de maatregel

De casestudy betreft een maatregel waarbij langsdammen de rivier bij lage afvoeren versmallen en oevergeulen achter de langsdammen de rivier bij hoge afvoeren verruimen. De oevergeulen worden gecreëerd door de kribben achter de langsdammen geheel of gedeeltelijk te verwijderen. De maatregel heeft als doel de bevaarbaarheid van de rivier bij laagwater te verbeteren zonder verhoging van de hoogwaterstanden en zonder repercussies op het bodemlengteprofiel. De maatregel wordt uitgevoerd op de Waal tussen km 868 en 920. Over dit traject wordt het zomerbed van de rivier met behulp van de langsdammen met 30 m versmald. Uitgangspunt is dat tijdens afvoeren hoger dan de gemiddelde afvoer, 15% van de zomerbedafvoer door de oevergeul achter de langsdammen stroomt. Met het gekalibreerde Waalmodel is het effect op het grootschalige morfologische gedrag en de bevaarbaarheid van de rivier geanalyseerd. Daarbij zijn een referentiesituatie zonder maatregel en een situatie met zowel langsdammen als oevergeulen onderscheiden.

3.1.2 Schematisatie van de maatregel

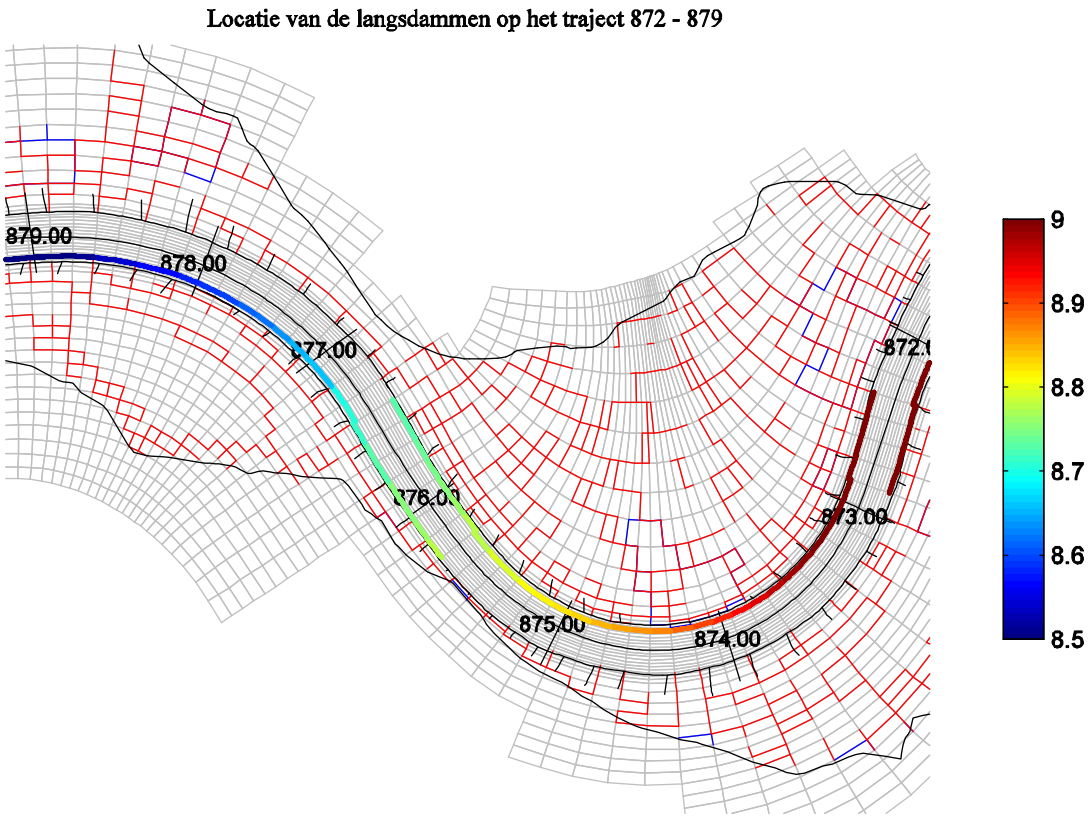
Schematisatie van de langsdammen

De langsdammen zijn handmatig geschematiseerd door middel van overlaten in de binnenbochten van de rivier. Ze bevinden zich op 30 m afstand van de normaallijnen. Bij bochtovergangen liggen de dammen plaatselijk aan weerszijden van het zomerbed op 15 m afstand van de normaallijnen. Om deze schematisatie mogelijk te maken, is het rekenrooster zodanig aangepast dat roostercellen langs de normaallijnen lokaal 15 m breed zijn. De hoogte van de langsdammen komt overeen met de waterstanden bij een gemiddelde afvoer van 1590 m^3/s. Deze waterstanden zijn afgeleid uit een hydraulische berekening met het geijkte Waalmodel. Figuur 3-1 geeft een voorbeeld van de schematisatie van de langsdammen. De kleuren van de langsdammen geven de hoogteligging aan ten opzichte van NAP. De dunnere rode en blauwe lijnen geven andere overlaten (kribben, zomerkades en obstakels) en ondoorlaatbare dammetjes weer.

Schematisatie van de afvoer door oevergeul

Bij afvoeren boven 1590 m^3/s wordt voorgeschreven dat 15% van de zomerbedafvoer door de oevergeulen stroomt. Dit wordt geschematiseerd door een lokale wateronttrekking aan het begin van elke langsdam en een terugvoering van water aan het einde van elke langsdam. Tegelijkertijd worden de oevergeulen op deze locaties met behulp van ondoorlaatbare dammetjes afgesloten om dubbeltelling te voorkomen.

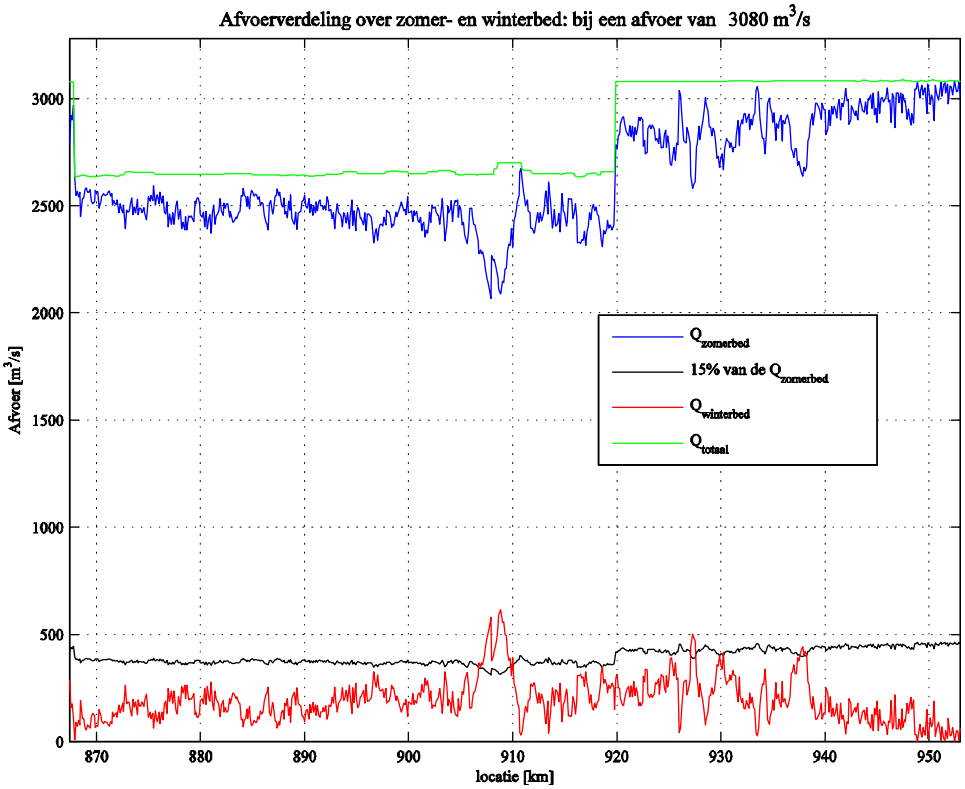
Laterale uitwisseling over de dammen blijft daarbij wel mogelijk. Voor elk afvoerniveau boven 1590 m^3/s in de in Paragraaf 3.1.4 gedefinieerde afvoerreeksen is een hydraulische berekening uitgevoerd om de afvoer door de oevergeulen te bepalen. Een voorbeeld van de afvoerverdeling over zomerbed, winterbed en oevergeul is te zien in Figuur 3-2.



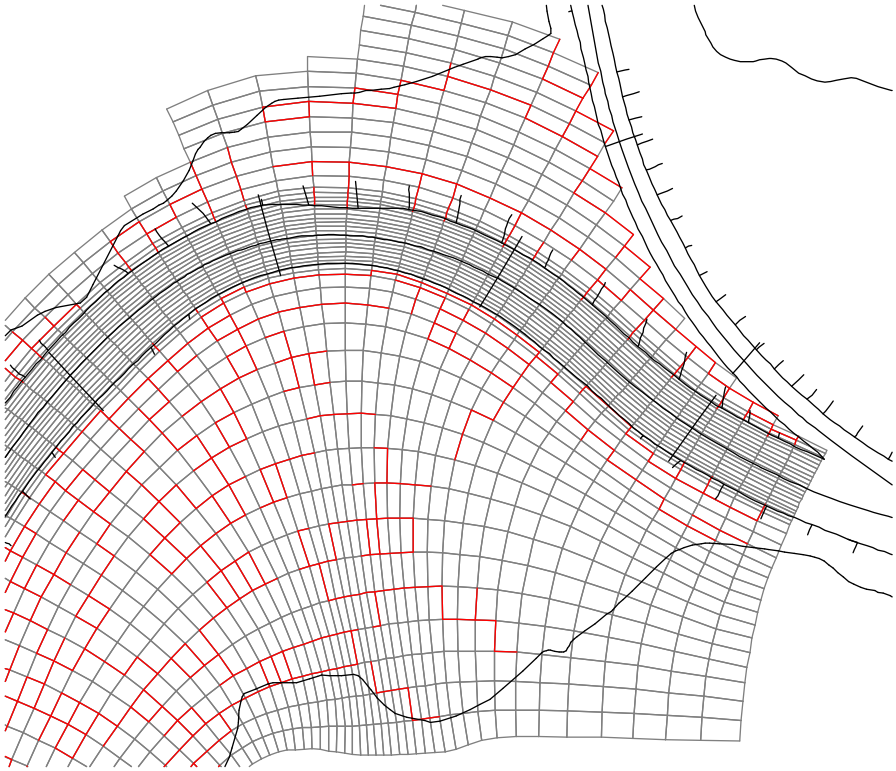
Figuur 3-1. Locatie en hoogte van de langsdammen op het traject km 872-879.

3.1.3 Aanpassing rekenrooster

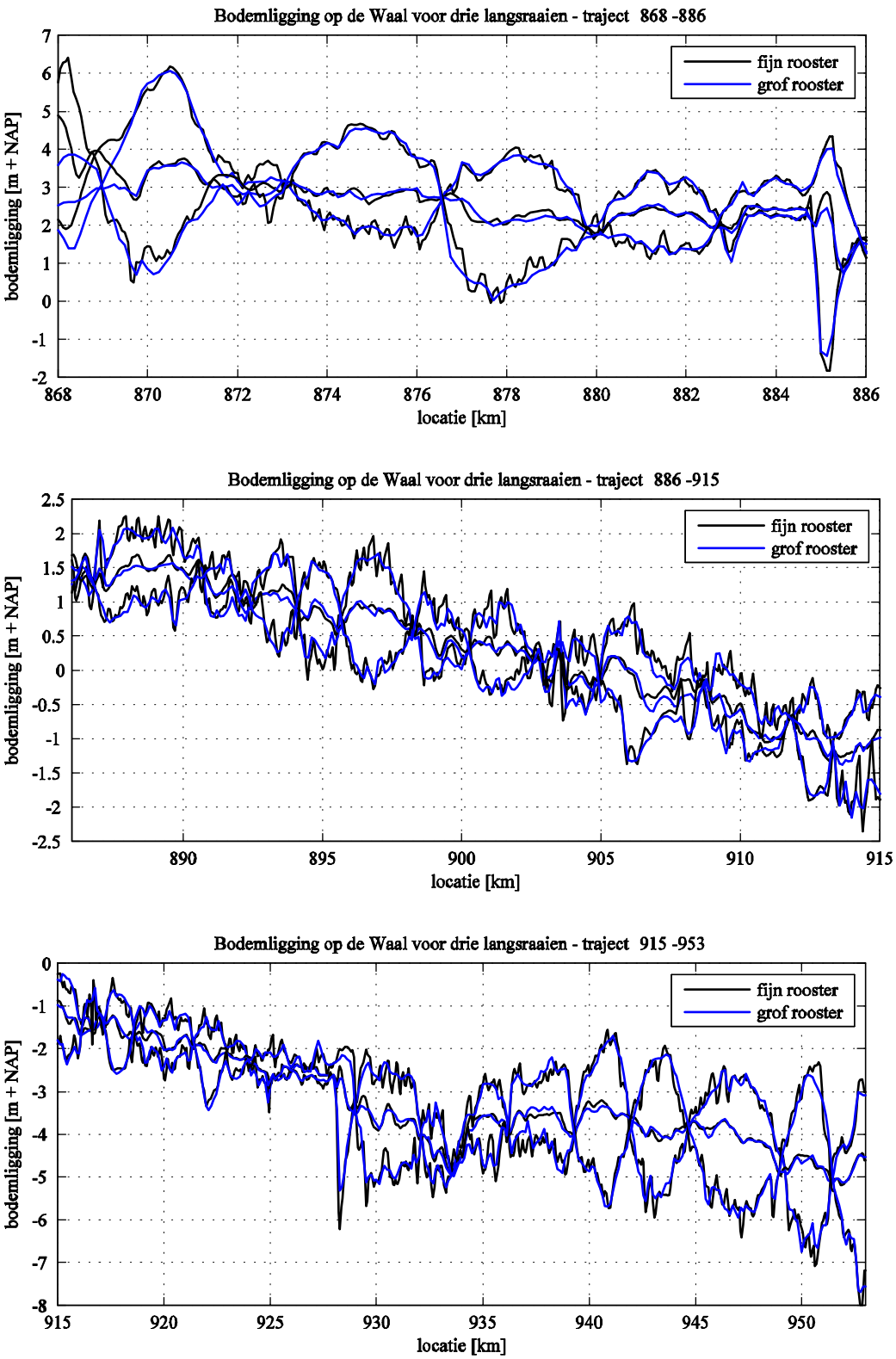
Ten behoeve van rekentijdreductie is naast het originele fijne rekenrooster een grover rooster gegenereerd dat afwijkt van het grove rooster uit de kalibratiefase. In langsrichting zijn de roostercellen overal met een factor twee vergroot. In dwarsrichting zijn de cellen alleen in de uiterwaarden met een factor twee vergroot. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3-3. Aangezien het rooster in het zomerbed nu alleen in langsrichting is vergrofd, zijn de afwijkingen tussen de berekeningen met het grove en het fijne rooster nu kleiner dan bij de kalibratie. Figuur 3-4 geeft voor beide rekenroosters de berekende bodemliggingen na een periode van 5 jaar langs rivieras, linkeroever en rechteroever. De afwijkingen worden vooral veroorzaakt door een minder gedetailleerde weergave van de kribben, waardoor het gedeelte van de bodem dat rondom de kribkoppen is vastgelegd verschilt.



Figuur 3-2. Afvoerverdeling over zomerbed, winterbed en oevergeul bij een totale afvoer van 3080 m^3/s.



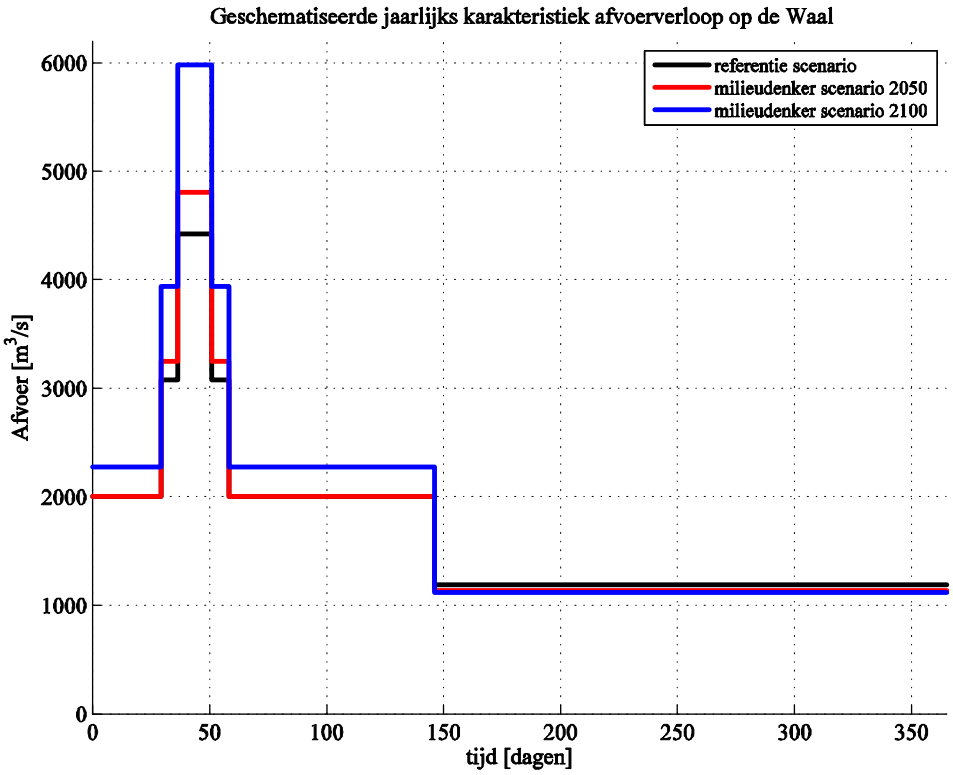
Figuur 3-3. Vergrofd rekenrooster: in langsrichting overal met een factor 2, in dwarsrichting alleen in de uiterwaarden met een factor 2.



Figuur 3-4. Lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Waal voor berekeningen met het fijne en het grove rooster, na een periode van 5 jaar.

3.1.4 Afvoerscenario's

Rijkswaterstaat RIZA heeft drie toekomstige afvoerscenario's van Beersma et al (2004) voor morfologische berekeningen geschematiseerd: (1) het referentiescenario, (2) het milieudenkerscenario 2050 en (3) het milieudenkerscenario 2100. In de milieudenkerscenario's wordt aangenomen dat klimaatverandering de afvoeren in het laagwaterseizoen lager maakt en in het hoogwaterseizoen hoger. Voor de modelberekeningen wordt een 20-jarig verloop van afvoertijdreeksen verkregen door herhaling van de geschematiseerde jaarlijkse verlopen die voor elk scenario zijn weergegeven in Figuur 3-5 en Tabel 3-1.



Figuur 3-5. Geschematiseerd jaarlijks afvoerverloop voor drie afvoerscenario's: (1) referentiescenario, (2) milieudenkerscenario 2050 en (3) milieudenkerscenario 2100.

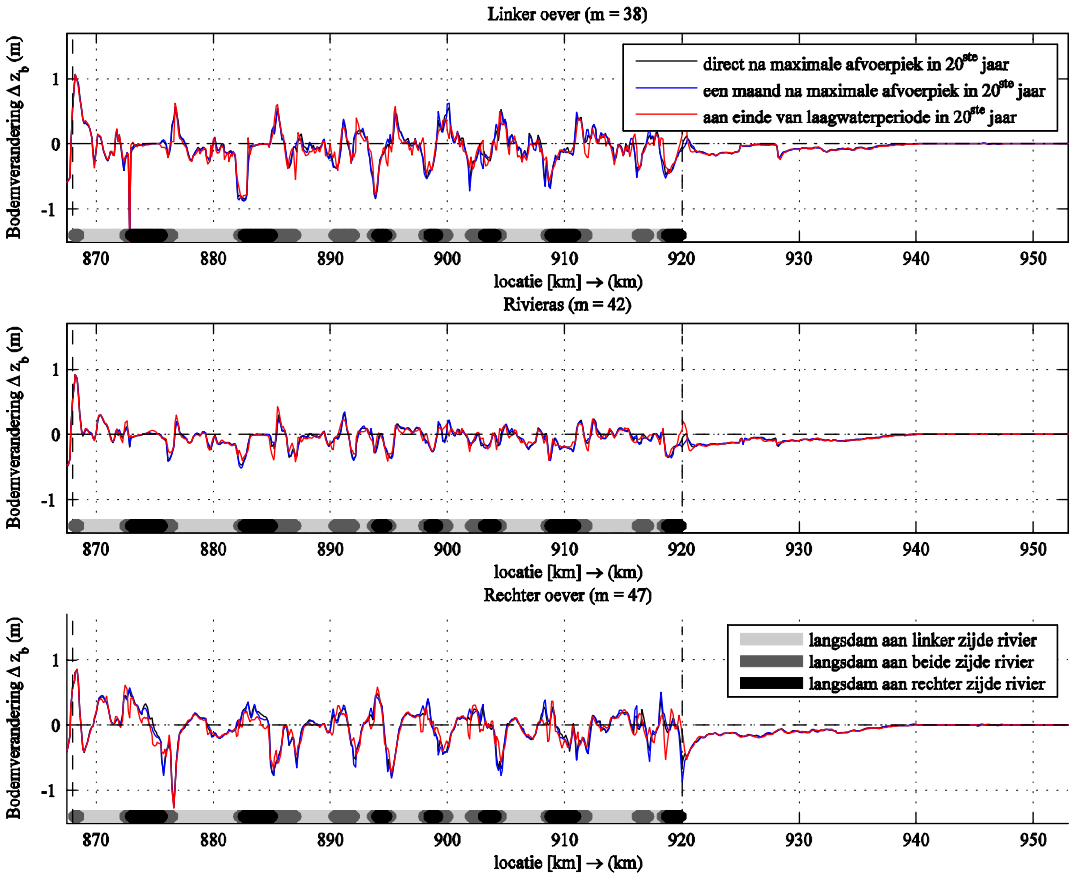
Tabel 3-1. Geschematiseerd jaarlijks afvoerverloop voor drie afvoerscenario's: (1) referentiescenario, (2) milieudenkerscenario 2050 en (3) milieudenkerscenario 2100.

Tijd (dagen)	Afvoertijdreeks per scenario (m^3/s)		
	referentie	milieudenker 2050	milieudenker 2100
30	2000	2000	2277
8	3080	3245	3934
14	4422	4807	5976
8	3080	3245	3934
86	2000	2000	2277
219	1187	1131	1115

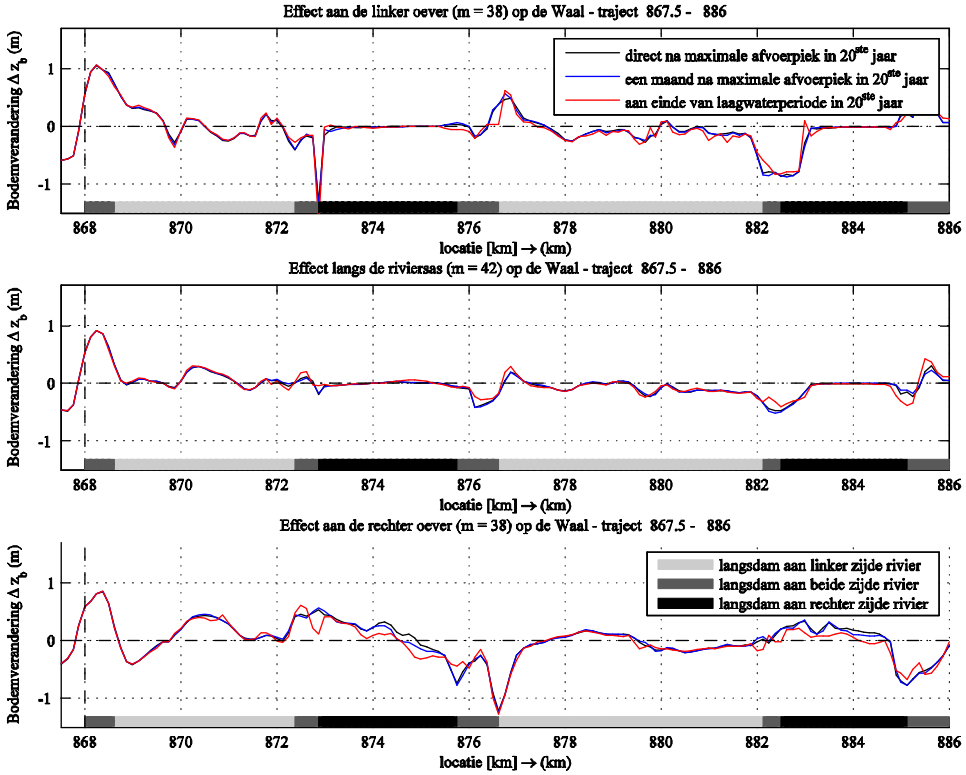
3.2 Resultaten

3.2.1 Effect op het morfologische gedrag

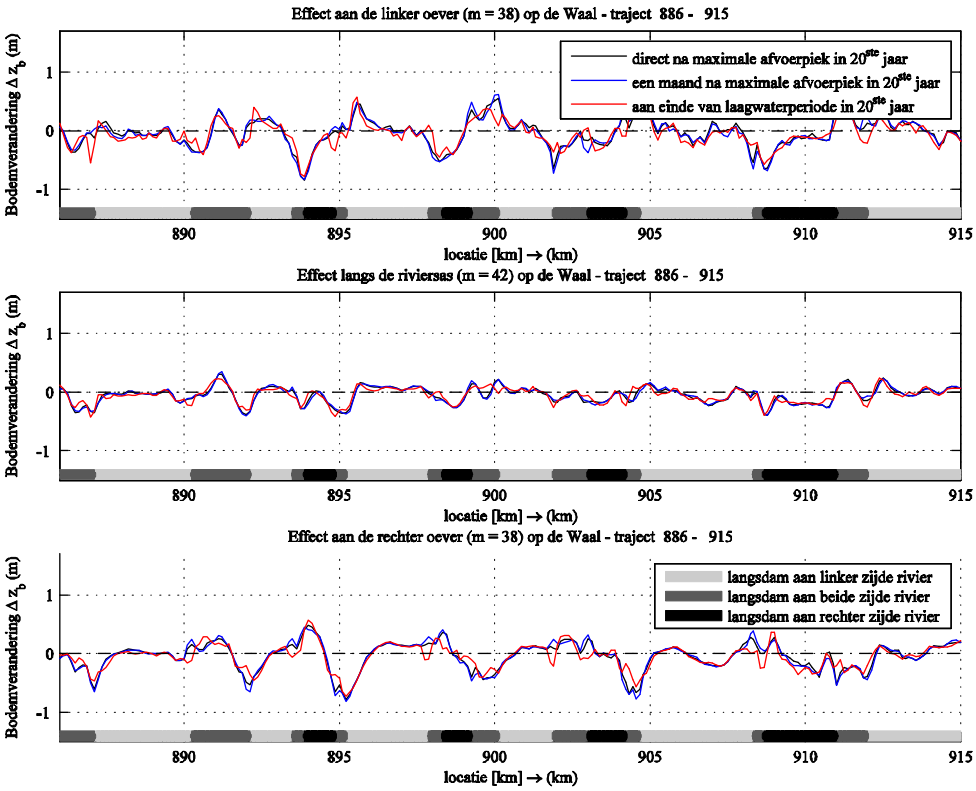
Het effect van de langsdammen voor het referentie-afvoerscenario is weergegeven in Figuur 3-6. De figuur toont het verschil tussen de berekening met en zonder maatregel, voor drie langsprofielen (rivieras, rechteroever en linkeroever) en voor drie tijdstippen: direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar, een maand na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar en aan het einde van de laagwaterperiode in het 20ste jaar. Figuur 3-7 tot en met Figuur 3-9 geven het effect in meer detail weer voor de trajecten Boven-Waal, Midden-Waal en Beneden-Waal. Deze figuren geven ook de oevers aan waarlangs de langsdammen zijn aangebracht. Zichtbaar is in het bijzonder het effect van de onttrekkingen en terugvoeringen van de afvoer aan de uiteinden van de langsdammen. Tijdens hogere afvoeren worden sedimentatiegolven opgewekt bij de onttrekkingen en erosiegolven bij de terugvoeringen. Deze bodemgolven planten zich stroomafwaarts voort en dempen gedeeltelijk uit tijdens lagere afvoeren. Dit effect is nog duidelijker te zien in Figuur 3-10. Omdat de bodemligging als gevolg van afvoervariaties gedurende een jaar flink kan variëren, is voor het 20ste jaar van de simulatie naast het tijdsgemiddelde effect op de bodemligging ook een bandbreedte van dit effect bepaald uit de minimale en maximale verschillen ten opzichte van de referentiesituatie. Figuur 3-11 geeft de resultaten hiervan voor de Midden-Waal.



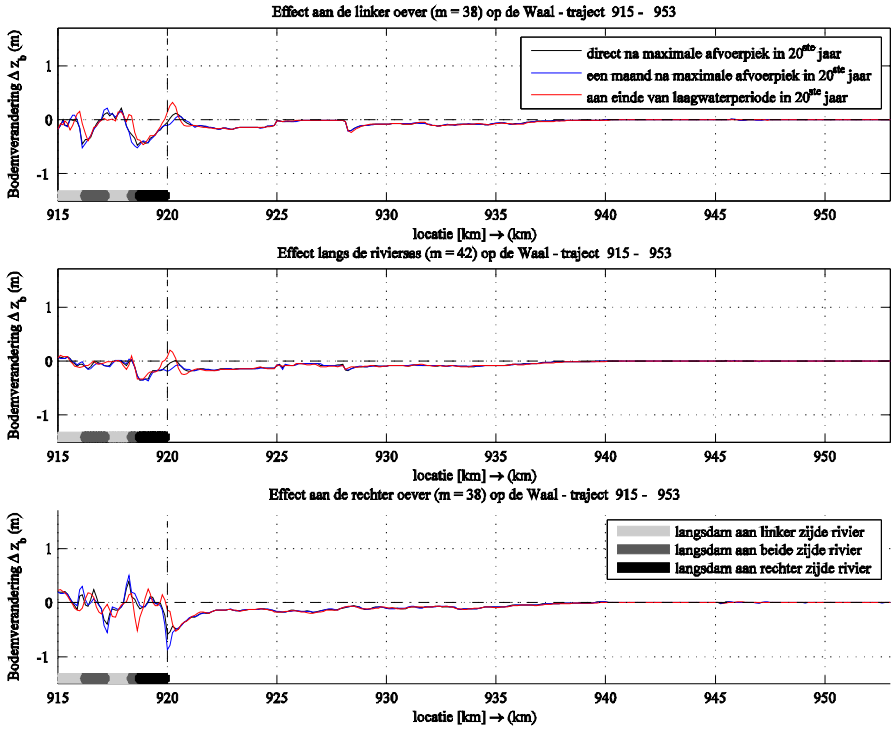
Figuur 3-6. Effect van langsdammen op bodemligging voor lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Waal.



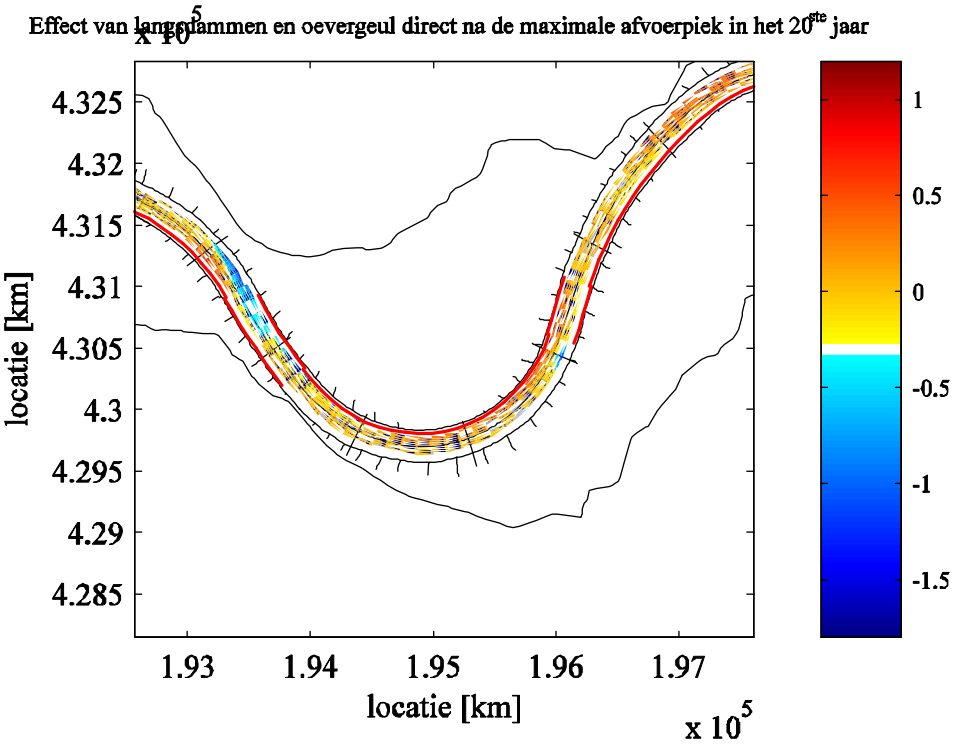
Figuur 3-7. Effect van langsdammen op bodemligging voor lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Boven-Waal.



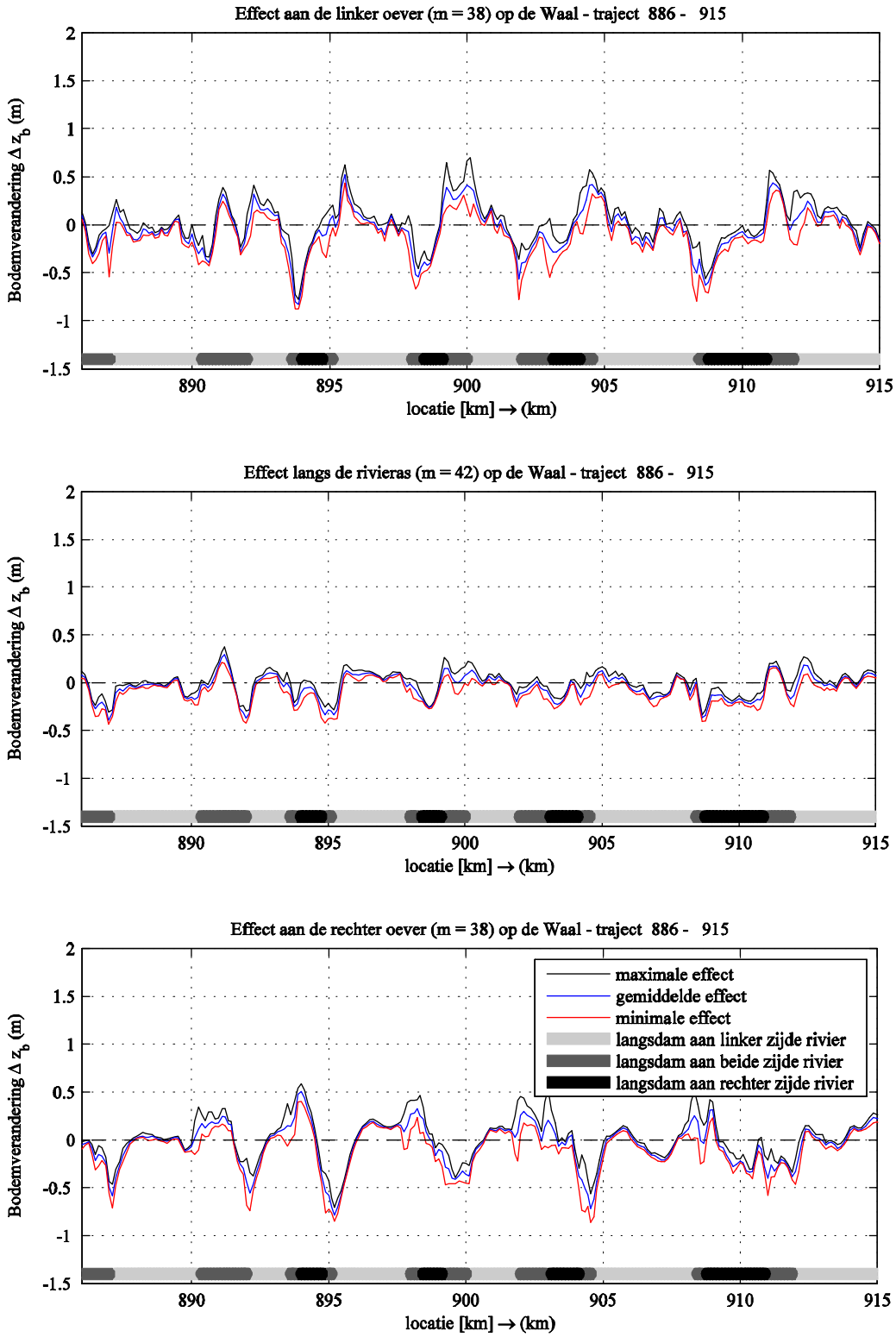
Figuur 3-8. Effect van langsdammen op bodemligging voor lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Midden-Waal.



Figuur 3-9. Effect van langsdammen op bodemligging voor lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Beneden-Waal.



Figuur 3-10. Bovenaanzicht van verschillen in bodemligging (m) tussen berekeningen met en zonder maatregel op het traject km 872-879.



Figuur 3-11. Statistische karakteristieken van het effect van langsdammen op bodemligging voor lengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Beneden-Waal.

3.2.2 Effect op de bevaarbaarheid

Het effect op de bevaarbaarheid is geanalyseerd door de huidige OLR [1] te projecteren op de berekende bodemliggingen direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar en aan het einde van de laagwaterperiode in het 20ste jaar. Om het vaarbaanprofiel onder OLR te beoordelen, zijn voor de genoemde tijdstippen de volgende resultaten grafisch uitgezet:

1. de maximale aaneengesloten vaarwegbreedte onder OLR langs de Waal bij vaarwegdieptes van 2,5 m en 2,8 m (Figuur 3-12 en Figuur 3-13);
2. de vaarwegdiepte onder OLR langs de Waal bij vaarwegbreedtes van 150 m en 170 m (Figuur 3-14 en Figuur 3-15).

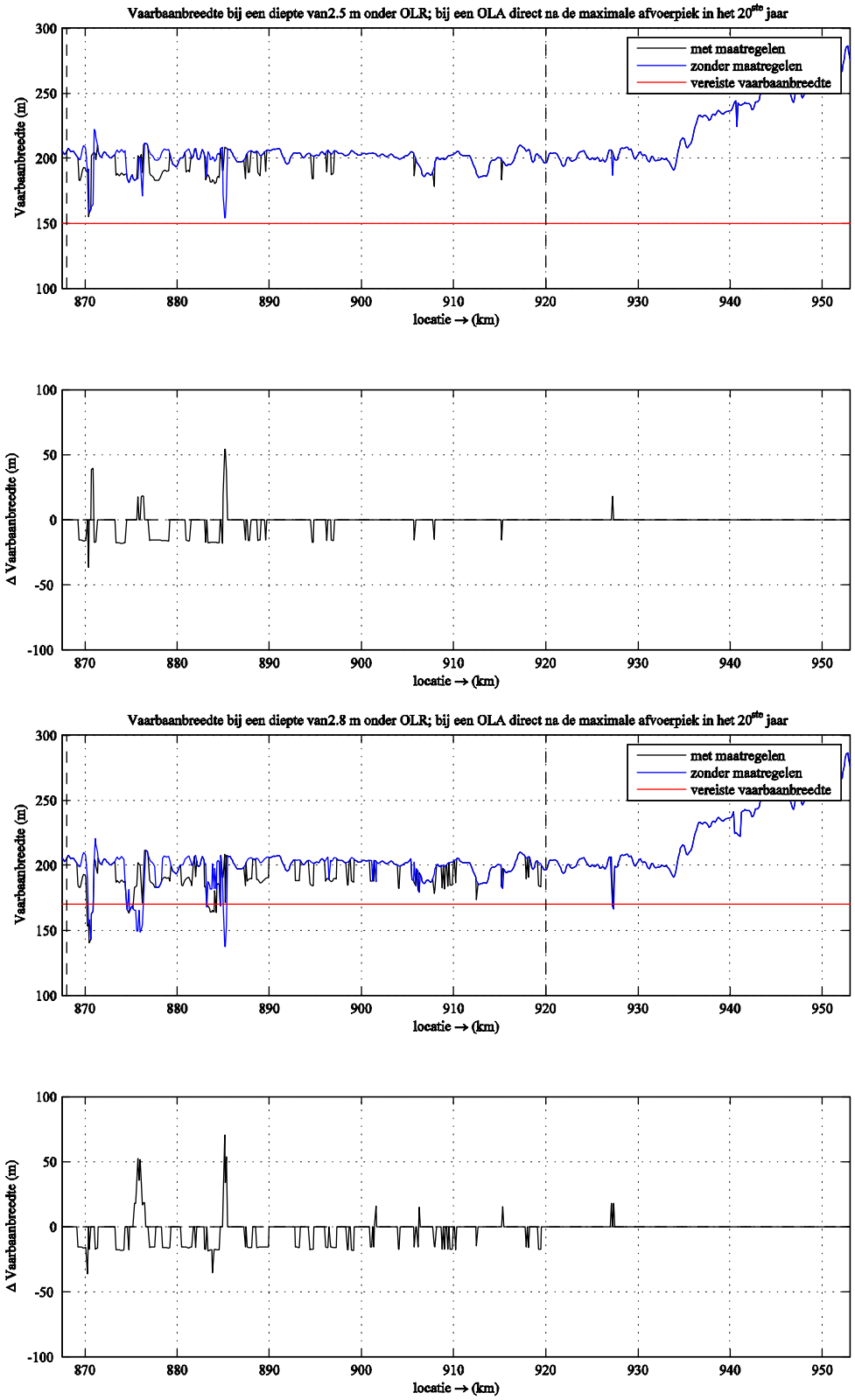
Vrijwel over de gehele rivier voldoet de rivier in het 20ste jaar aan een vaarwegprofiel van 150 m × 2,5 m, maar een vaarwegprofiel van 170 m × 2,8 m wordt op verschillende trajecten niet gehaald. De maatregel vergroot op veel plaatsen de vaarwegdiepte, maar verkleint de vaarwegbreedte. De grootste problemen treden op direct na de maximale piekafvoer. Figuur 3-16 en Figuur 3-17 laten zien dat de maatregel op het traject km 870-890 de knelpunten oplost. De bevaarbaarheid ter plaatse van het knelpunt op km 883-884 verslechtert echter juist. Een mogelijke verklaring ligt in de geringe sedimenttransporterende breedte in smalle bochten die ook bij vaste lagen in smalle bochten leidt tot aanzandingen van de binnenbocht (Sloff et al, 2006).

3.2.3 Effect van afvoerscenario's

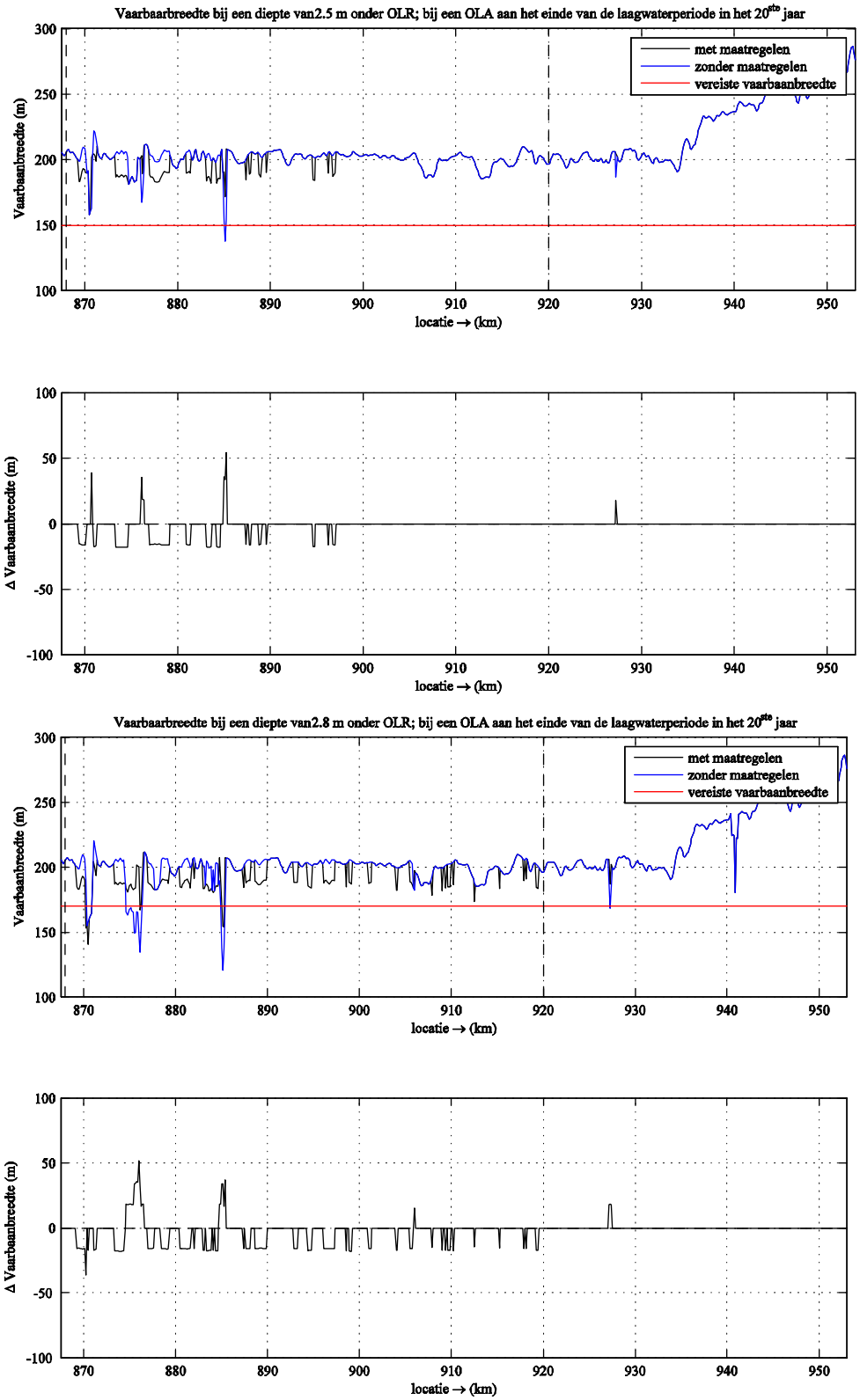
Figuur 3-18 laat het verschil zien in het maximale en minimale morfologische effect van de langsdammen in combinatie met oevergeulen voor het riviertraject tussen km 867 en km 886, in het 20ste jaar van de berekening. Dit verschil wordt hier "bandbreedte" genoemd. De bandbreedtes van de verschillende afvoerscenario's verschillen relatief weinig. De bandbreedte is het grootst voor het milieudenkerscenario 2100.

Figuur 3-19 toont het verschil in minimale vaardiepte direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar voor de Waal tussen km 870 en km 920 bij vaarwegbreedtes van 150 m en 170 m. De vaarbaanbreedte neemt in het milieudenkerscenario 2100 met 19 m af als de vaarwegdiepte 2,5 m is, en met 43 m als de vaarwegdiepte 2,8 m is.

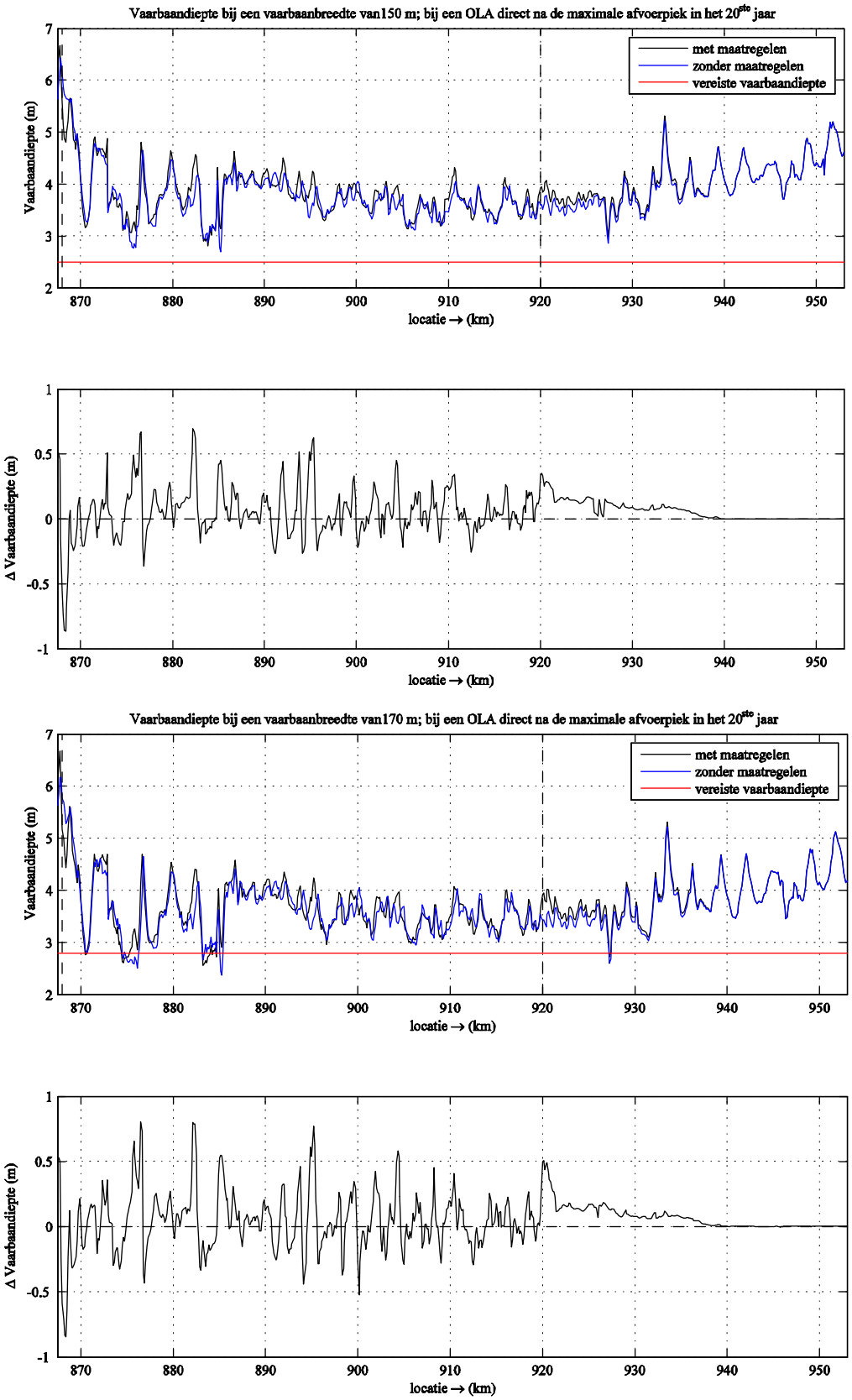
[1] *OLR = Overeengekomen Lage Rivierstand behorend bij een voorgeschreven Overeengekomen Lage Afvoer. Voor de Waal geldt een OLA van 818 m^3/s. De OLR wordt elke vijf jaar opnieuw vastgesteld.*



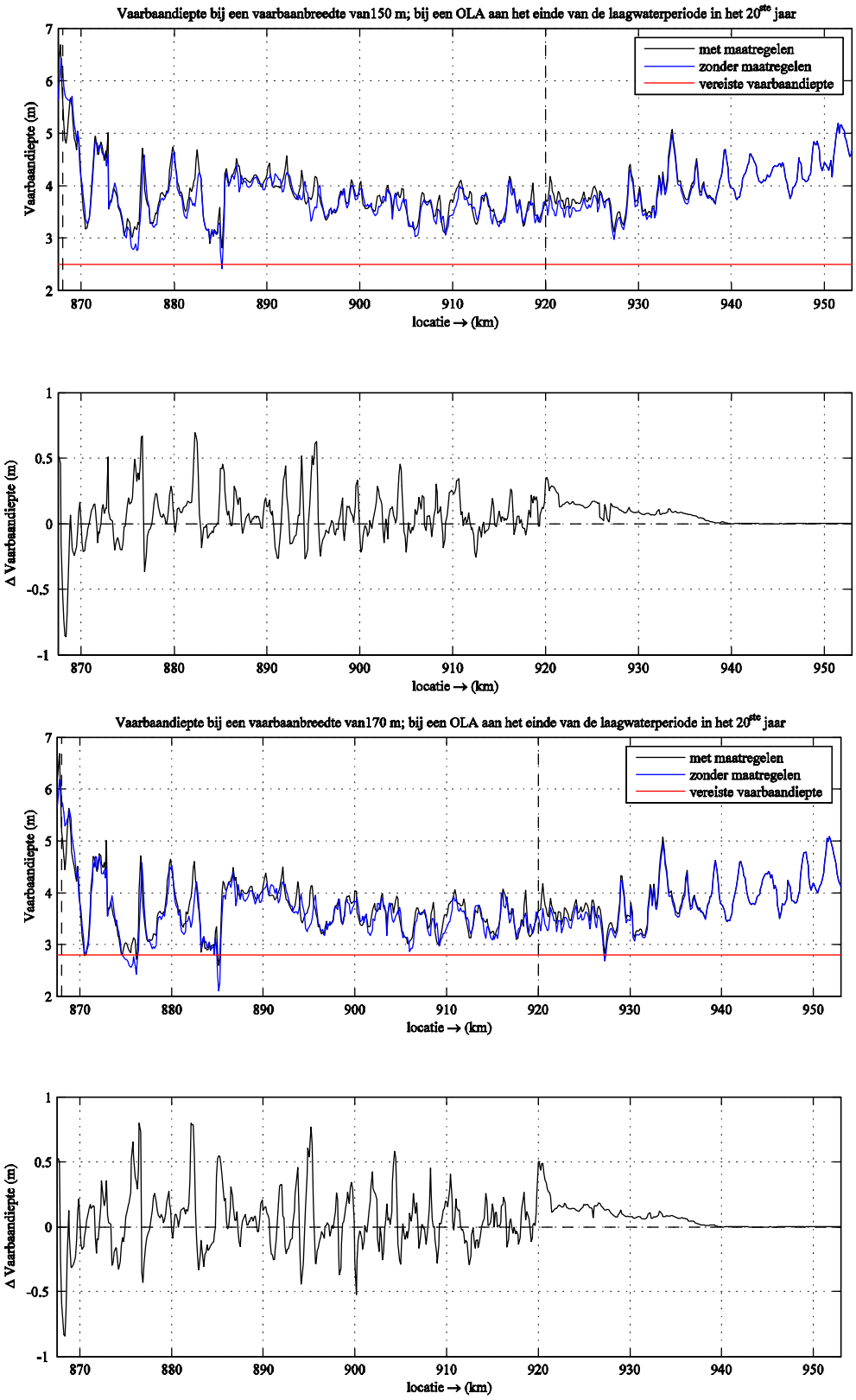
Figuur 3-12. De maximale (aaneengesloten) vaarwegbreedte onder OLR langs de Waal direct na de maximale afvoer piek in het 20ste jaar, bij vaarwegdieptes van 2,5 m en 2,8 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



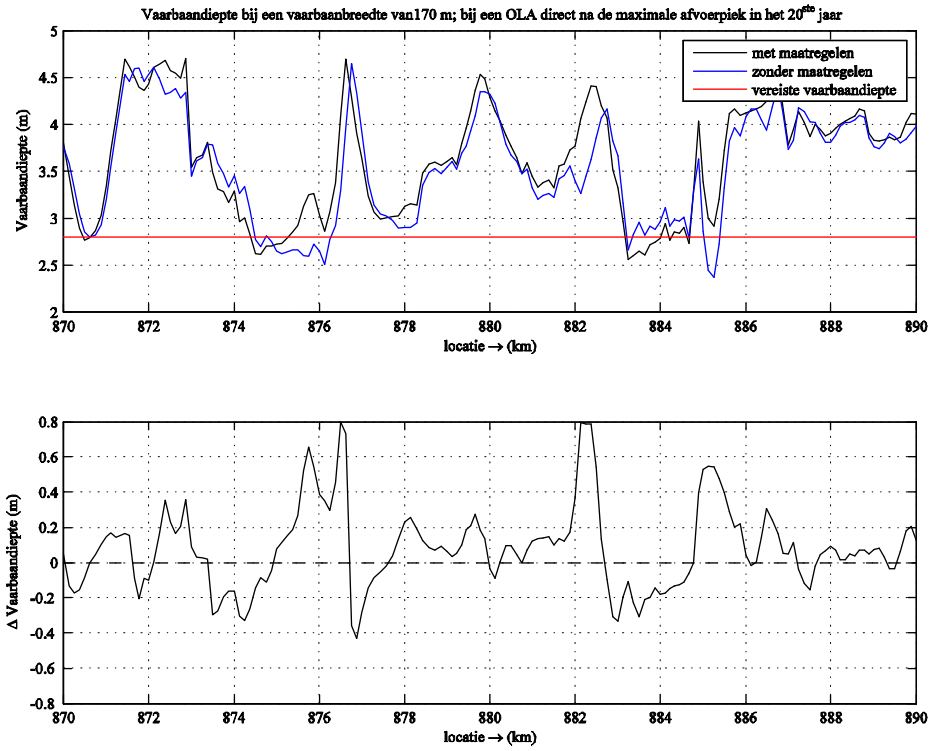
Figuur 3-13. De maximale (aaneengesloten) vaarwegbreedte onder OLR langs de Waal na de laagwaterpriode in het 20ste jaar, bij vaarwegdieptes van 2,5 m en 2,8 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



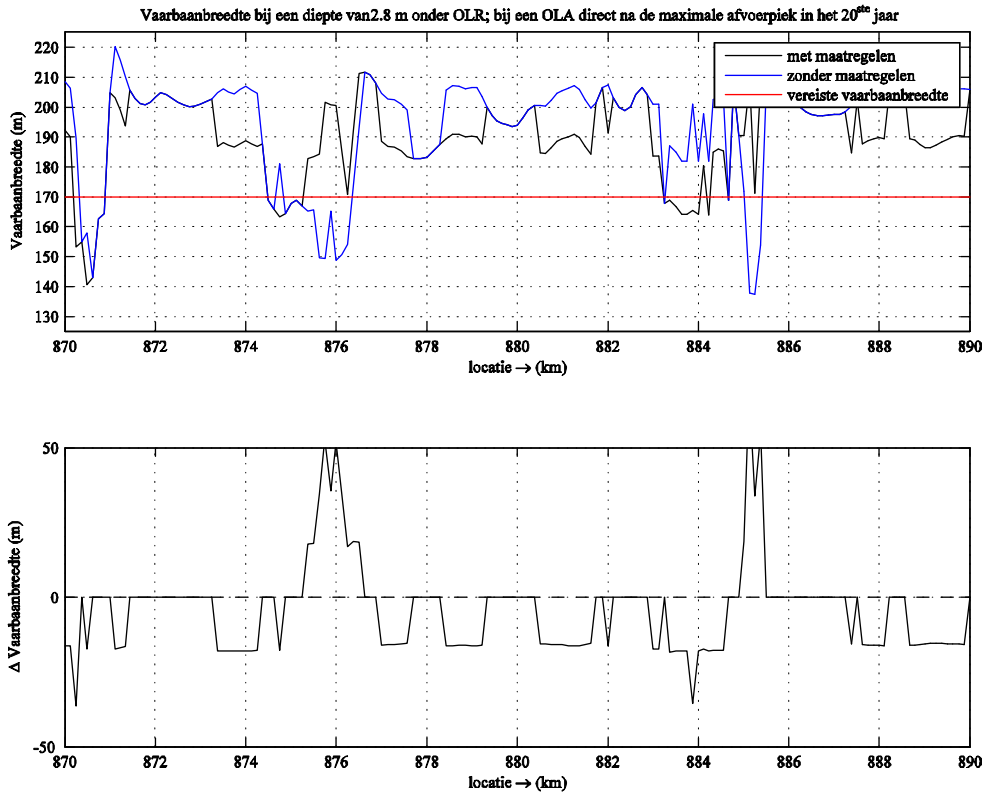
Figuur 3-14. De minimale vaarwegdiepte onder OLR langs de Waal direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar, bij vaarwegbreedtes van 150 m en 170 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



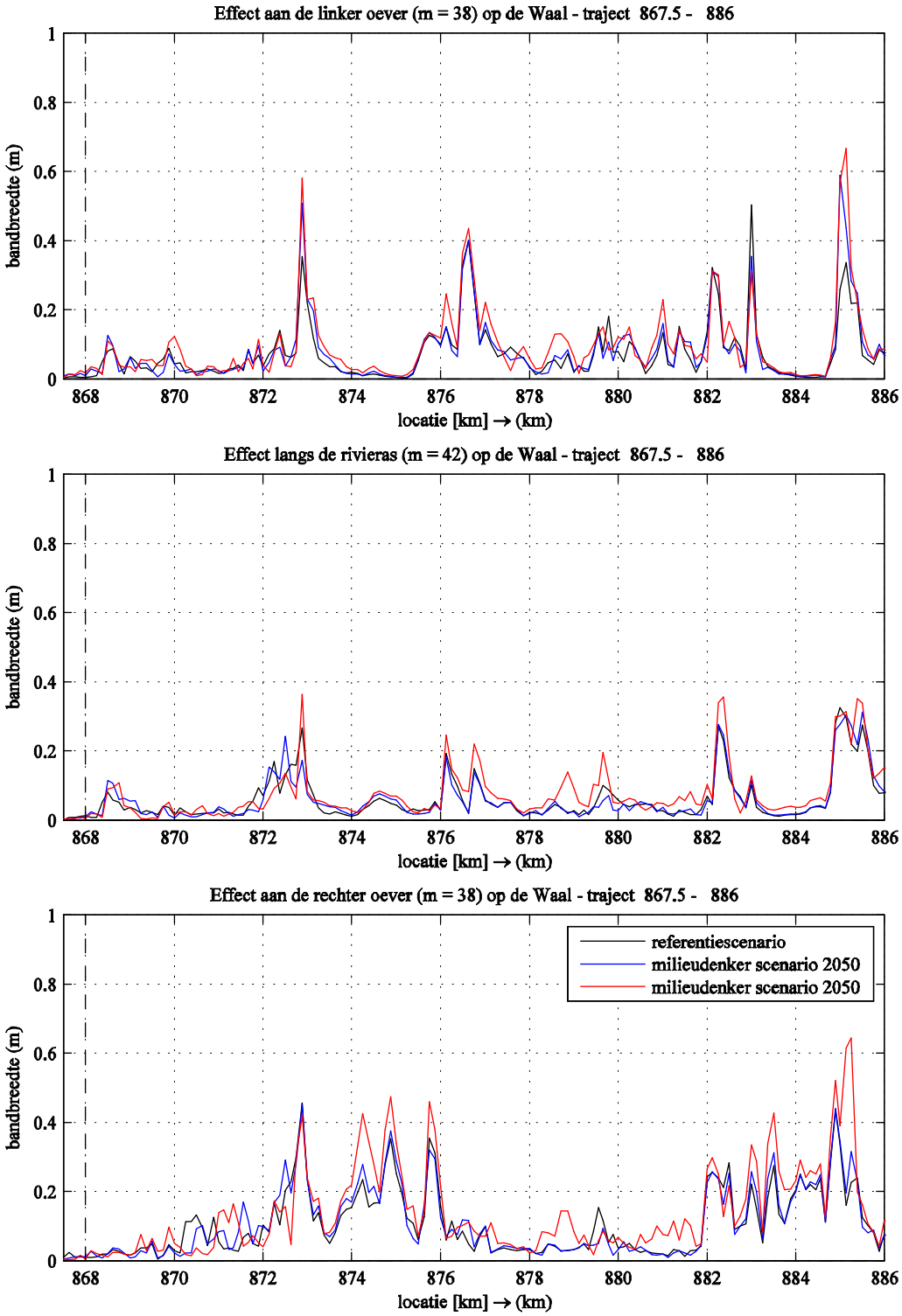
Figuur 3-15. De minimale vaarwegdiepte onder OLR langs de Waal na de laagwaterperiode in het 20ste jaar, bij vaarwegbreedtes van 150 m en 170 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



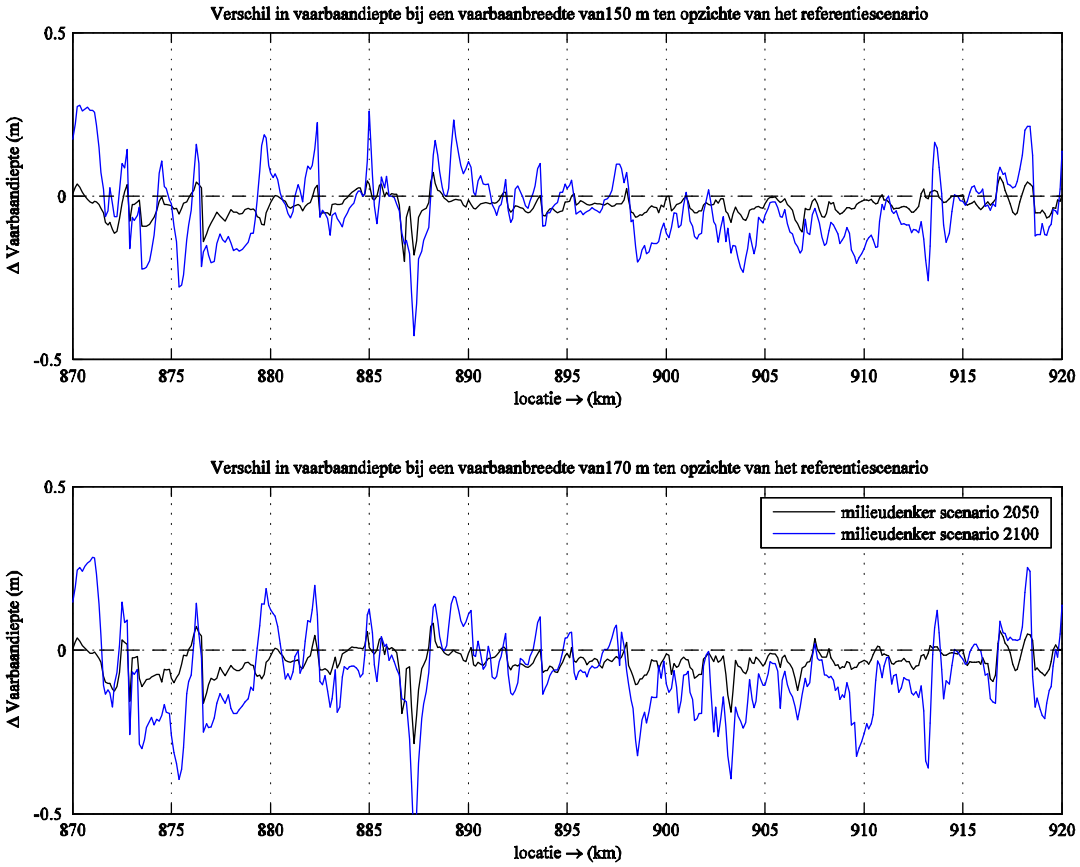
Figuur 3-16. De minimale vaarwegdiepte onder OLR langs de Waal tussen km 870 en 890 direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar, bij een vaarwegbreedte van 170 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



Figuur 3-17. De minimale vaarwegbreedte onder OLR langs de Waal tussen km 870 en 890 direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar, bij een vaarwegdiepte van 2,8 m, het referentie-afvoerscenario en situaties zonder en met maatregel.



Figuur 3-18. Bandbreedte van het morfologische effect van de langsdammen voor bodemlengteprofielen langs linkeroever, rivieras en rechteroever van de Beneden-Waal.



Figuur 3-19. Verschil in minimale vaarwegdiepte onder OLR langs de Waal tussen km 870 en 920 direct na de maximale afvoerpiek in het 20ste jaar, bij vaarwegbreedtes van 150 m en 170 m, situaties zonder en met maatregel en de milieudenkerscenario's 2050 en 2100 ten opzichte van het referentie-afvoerscenario.

3.3 Discussie

Gevonden is dat in het bijzonder de onttrekkingen van de afvoer aan het begin van de langsdammen knelpunten veroorzaken. Tijdens hogere afvoeren worden hier sedimentatiegolven opgewekt die zich tijdens lagere afvoeren stroomafwaarts verplaatsen en gedeeltelijk weer uitdempen. Bij verdere optimalisatie van de maatregel zou een vervolgstudie zich daarom moeten richten op het beantwoorden van de volgende vragen:

- Zijn ongunstige lokale aanzandingen te minimaliseren door (1) instroming en uitstroming over een iets langer traject geleidelijk te laten plaatsvinden, (2) het moment van meestromen beter te kiezen, of (3) de ligging van de uiteinden van de langsdammen beter te kiezen?
- Wat gebeurt er precies ter plaatse van de vaste laag in de bocht bij Nijmegen? Wat is het gecombineerde effect van een vaste laag en versmalling door langsdammen? Zijn de langsdammen inderdaad in smalle bochten minder effectief?
- In de berekeningen is de OLR van de huidige situatie gebruikt, maar deze zal door de aanleg van langsdammen wijzigen. In een vervolg zal hiervoor een gecorrigeerde OLR gebruikt moeten worden.

4 Casestudy B: beheer bij ruimere vaargeul

4.1 Aanpak

4.1.1 Modelontwikkeling

In een voorgaande opdracht verbeterden Yossef et al (2006) de functionaliteit van Delft3D ten aanzien van baggeren en storten. Deze functionaliteit is hier verder uitgebreid om de complexe strategieën voor vaarwegbeheer op de Waal beter te kunnen simuleren. Daarvoor zijn de volgende aanvullende mogelijkheden in Delft3D ingebouwd:

- Mogelijkheid om rekening te houden met de invloed van beddingvormen voor gevallen waarin gerekend wordt met een duinhoogtevoorspeller (Van Vuren & Ottevanger, 2006);
- Mogelijkheid om intervallen voor baggeren en storten te specificeren, zodat baggeractiviteiten alleen in bepaalde periodes, bijvoorbeeld tijdens laagwaters, geactiveerd worden;
- Mogelijkheid om materiaal van buiten het model in een opgegeven hoeveelheid en samenstelling op aangewezen locaties te suppleren;
- Mogelijkheid om overschotten aan materiaal bij te houden die nergens in het model gestort kunnen worden;
- Mogelijkheid om materiaal achtereenvolgens in een reeks van verschillende stortvakken te storten, waarbij automatisch naar een volgend vak wordt uitgeweken zodra een bepaald vak vol is.

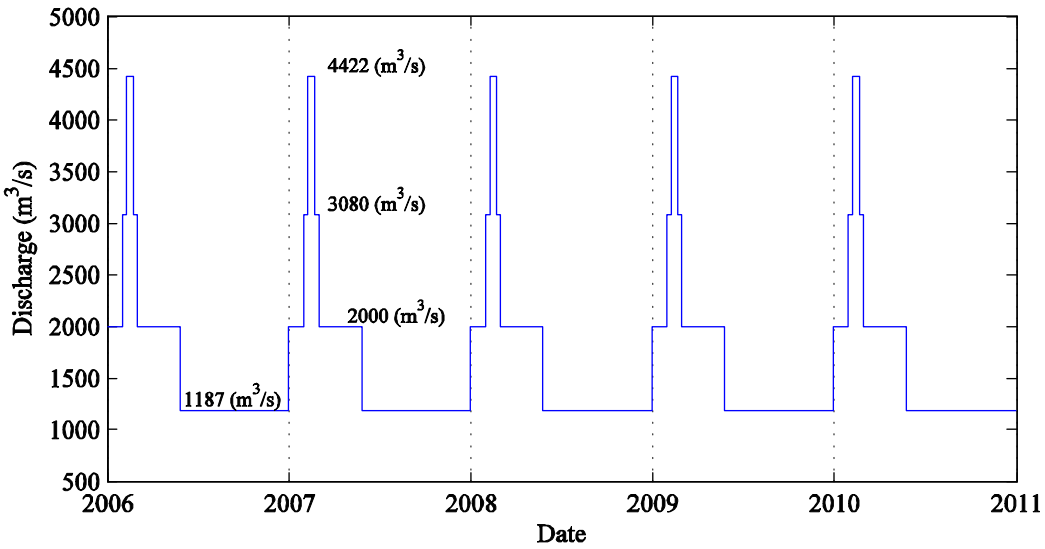
4.1.2 Opzet van de casestudy

De simulaties voor Casestudy B zijn uitgevoerd met het rekenrooster van Hoofdstuk 2 en de nieuwe versie van Delft3D met aanvullende functionaliteit voor baggeren en storten (FLOW-module versie 3.54.13.00.r.01.WO03). De uiteindelijke simulaties zijn uitgevoerd op het Linux-cluster van WL | Delft Hydraulics. Naast een referentieberekening zonder baggeren zijn voor de volgende drie beheersdoelen berekeningen gemaakt:

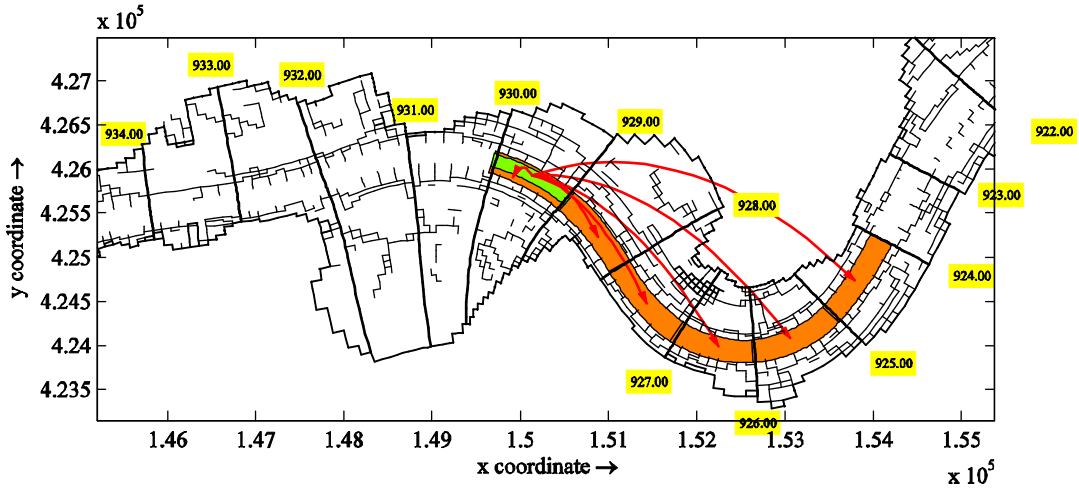
1. Huidig vaarwegprofiel van 2,5 m × 150 m gedurende 95% van de tijd (Beheersdoel B150);
2. Vaarwegprofiel van 2,8 m × 170 m gedurende 95% van de tijd (Beheersdoel B170);
3. Vaarwegprofiel van 2,8 m × 150 m gedurende 95% van de tijd (Beheersdoel B152).

Voor alle beheersdoelen zijn de volgende instellingen toegepast:

1. Een geschematiseerde afvoerhydrograaf met vier afvoerniveaus overeenkomstig Figuur 4-1, waaraan nog een vijfde afvoer van 818 m^3/s gedurende 6 uur aan het einde van de laagwaterperiode is toegevoegd om OLR-waarden te kunnen actualiseren;
2. De OLR van 2002, vooralsnog zonder deze tijdens de berekening te actualiseren omdat de morfologische veranderingen betrekkelijk klein zijn;
3. Een simulatieduur van 5 jaar overeenkomstig Figuur 4-1, waarbij als startdatum gemakshalve 1 januari 2006 is aangehouden;
4. Baggervakken gedefinieerd op basis van door Rijkswaterstaat RIZA toegeleverde *shape files* van de 150 m en 170 m brede vaargeulen. De baggervakken zijn 1 km lang en beslaan de breedte van de vaargeul. Omdat baggeren plaats vindt tussen km 868 en km 952, zijn in totaal 85 baggervakken gedefinieerd. De vakken worden aangeduid met "KM_i", waarbij i het kilometernummer is, bijvoorbeeld KM_952;
5. Stortvakken gedefinieerd op basis van door Rijkswaterstaat RIZA toegeleverde *shape file* van het zomerbed tussen de normaallijnen. De stortvakken zijn 1 km lang en beslaan de breedte van het zomerbed. Ze worden aangeduid met "dump_KM_i", waarbij i het kilometernummer is, bijvoorbeeld dump_KM_952. Buiten de rivier is een virtueel vak gecreëerd voor materiaal dat nergens meer in de rivier gestort kan worden;
6. Een strategie waarbij voor ieder baggervak KM_i het gebaggerde materiaal gestort wordt op een traject van dump_KM_i-x_{min} tot dump_KM_i-x_{max}, met voorrang voor storten in het meest nabijgelegen vak dump_KM_i-x_{min}. Hierbij zijn x_{min} en x_{max} de minimale en maximale afstanden tot het baggervak. Als een stortvak dump_KM_i vol is, gaat het storten door in het volgende vak dump_KM_i+1 en zo door tot en met dump_KM_i-x_{max}, of buiten het model indien alle vakken vol zijn. In deze casestudy is x_{min} = 0 km en x_{max} = 5 km aangehouden;
7. Een beperking van baggeractiviteiten tot de laagwaterperioden met een afvoer van 1187 m^3/s.



Figuur 4-1. Geschematiseerde afvoerhydrograaf voor de Waal.



Figuur 4-2. Voorbeeld van een strategie voor baggeren en storten, met baggeren in het vak KM_929 (groen) en storten in achtereenvolgens KM_929 tot en met KM_924.

4.1.3 Beoordeling van baggerstrategieën

Voor een kwantitatieve vergelijking van baggerstrategieën, wordt de volgende kostenfunctie gebruikt om de kosten van het baggeren te berekenen:

$$\text{Kosten} = A \times 1.4V$$

met

$$A = \begin{cases} 2 + 0.6\,L & L \leq 30\,\text{km} \\ 20 & L > 30\,\text{km} \end{cases}$$

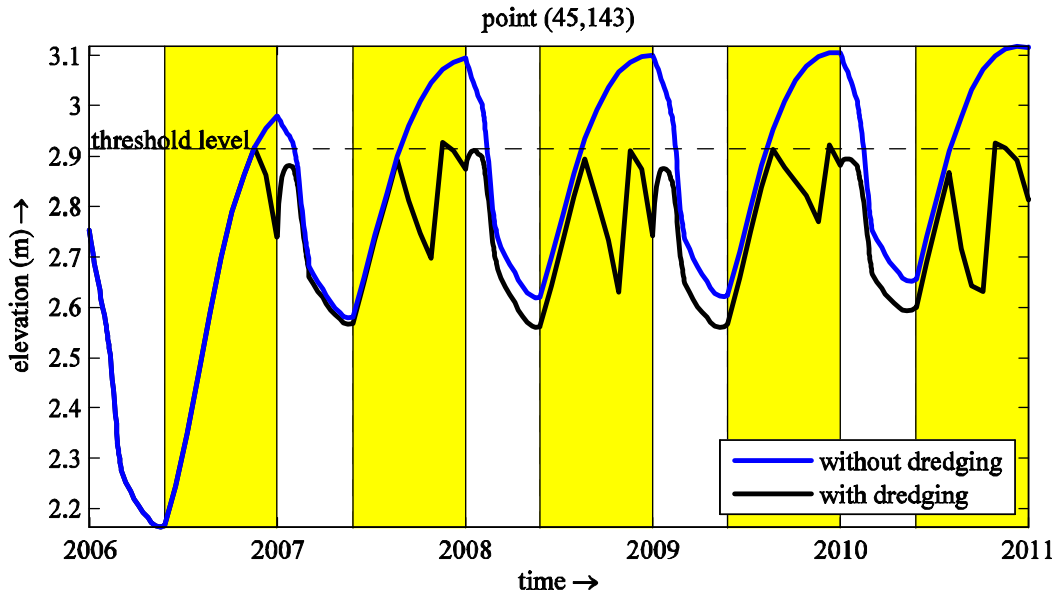
waarin:

V	=	volume van gebaggerd materiaal (m^3)
A	=	eenheidsprijs (euro/m^3)
L	=	afstand tussen baggerlocaties en stortlocaties (km)

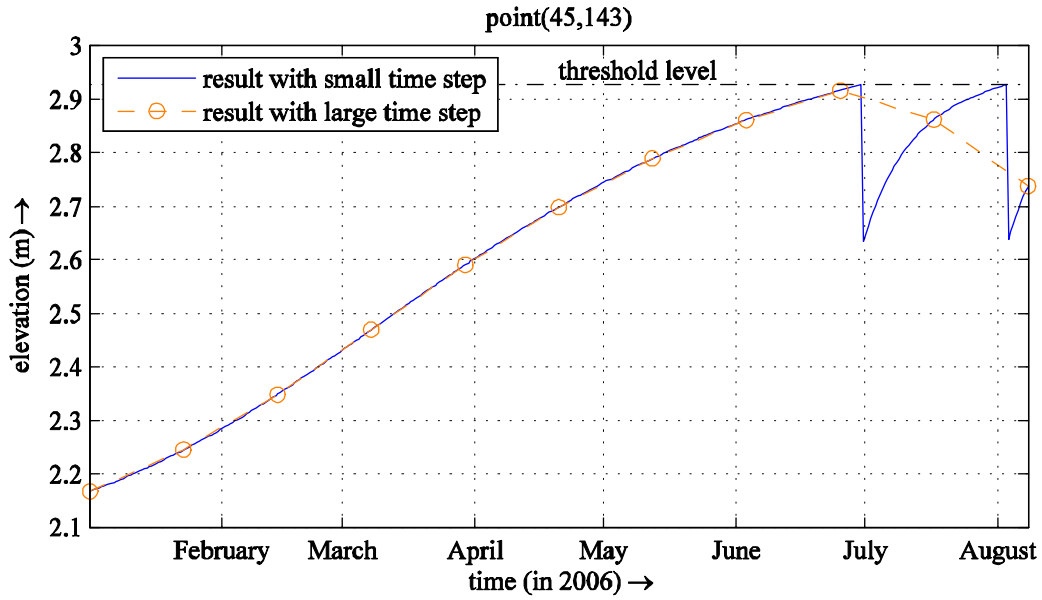
4.2 Resultaten

4.2.1 Variaties in de tijd

Figuur 4-3 laat zien dat de rivier na een jaar een dynamische evenwichtstoestand bereikt. Het baggeren start als een drempelwaarde bereikt wordt en stopt als de ondiepte binnen een baggervak verwijderd is. Deze figuur suggereert overigens ten onrechte dat het baggeren steeds tot een geleidelijke verlaging van de bodem leidt. Daarom toont Figuur 5-4 meer in detail hoe het baggeren iedere keer de bodem snel verlaagt en vervolgens weer door sedimentatie teniet wordt gedaan.



Figuur 4-3. Voorbeeld van tijdsafhankelijke ontwikkeling van bodemligging voor een punt in baggervak KM_885 met en zonder baggeren. De berekening is uitgevoerd voor Beheersdoel B150. Bagger-periodes zijn in geel aangegeven.



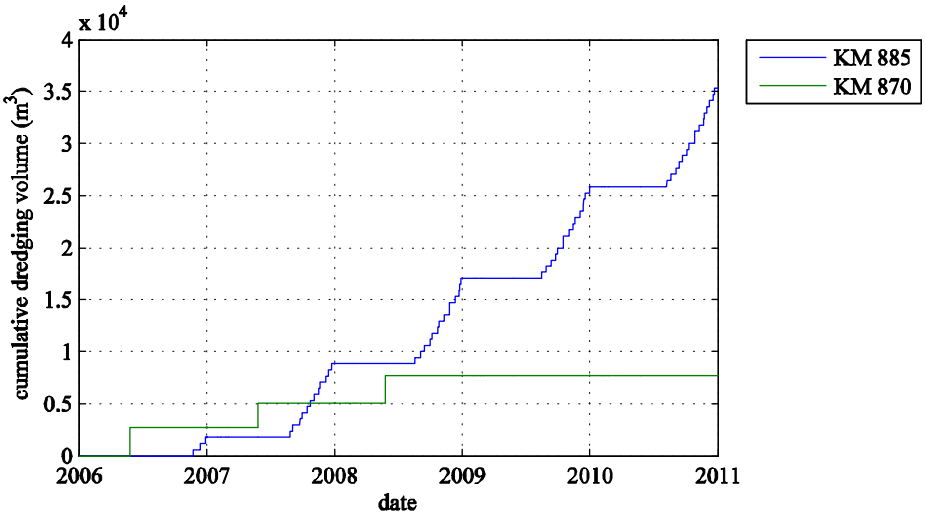
Figuur 4-4. Vergelijking tussen resultaten met een gebruikelijk interval en met een klein interval tussen tijdstippen waarvoor modeluitvoer wordt gegenereerd.

4.2.2 Beheersdoel B150

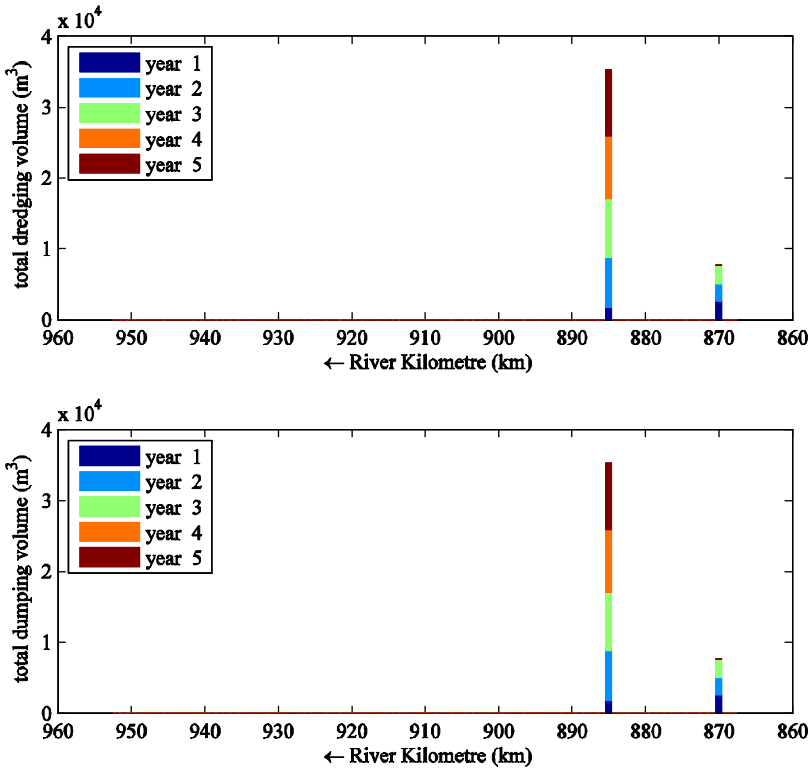
Beheersdoel B150 betreft de huidige situatie met een vaarwegprofiel van 2,5 m × 150 m. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4-1, waaruit blijkt dat slechts op twee plaatsen gebaggerd wordt met een totaal volume van 42.960 m^3 gedurende een periode van 5 jaar. Met de kostenfunctie uit Paragraaf 4.1.3 bedragen de bijbehorende kosten 120.288 euro over de periode van 5 jaar. Het was mogelijk om het gebaggerde materiaal lokaal te storten in de diepe delen van hetzelfde vak.

Tabel 4-1. Resultaten voor Beheersdoel B150.

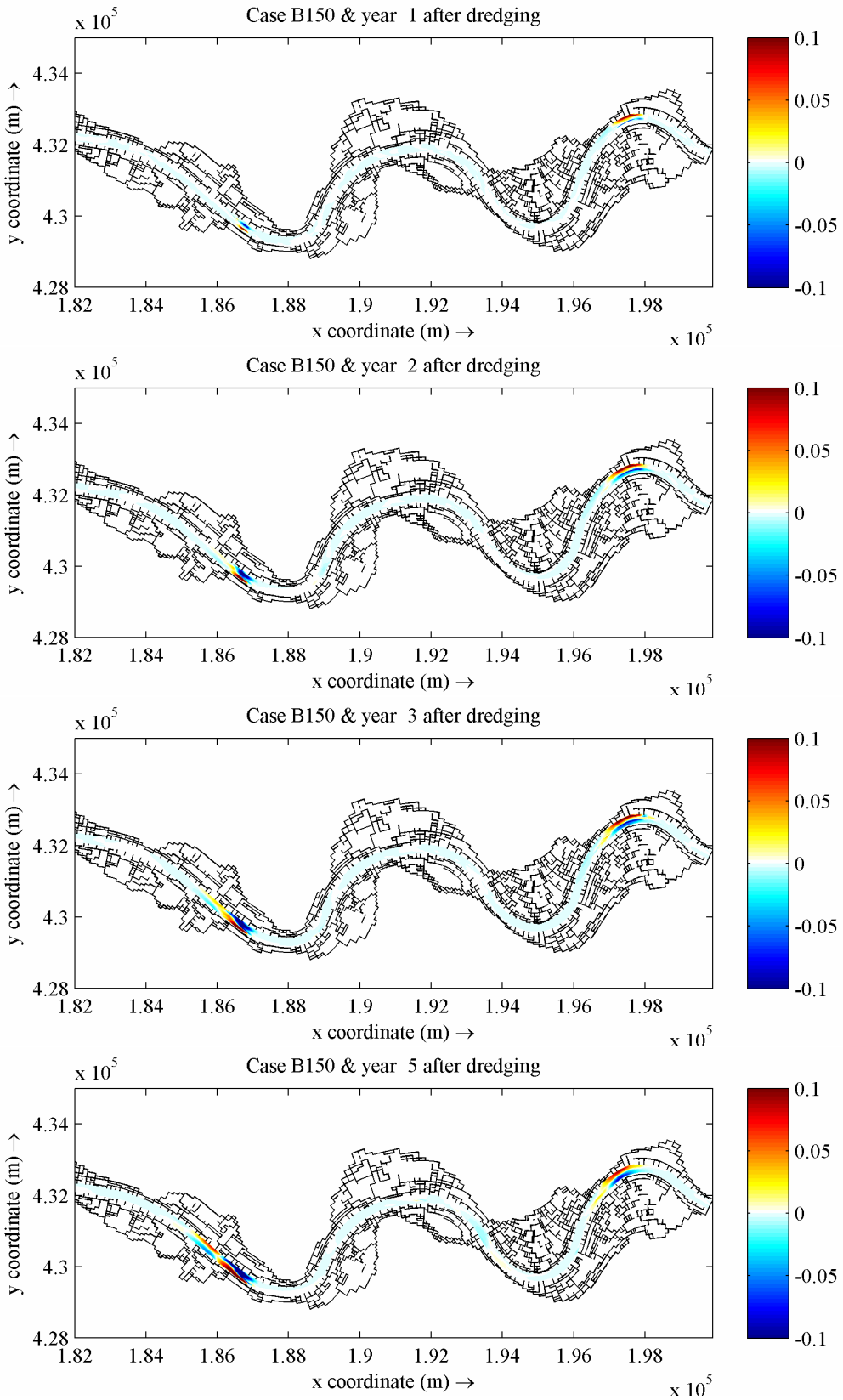
```
1. dredging from: KM_885, dumping into: dump_KM_885,  V =35271.8 m3
2. dredging from: KM_870, dumping into: dump_KM_870,  V = 7688.4 m3
```



Figuur 4-5. Cumulatief verloop van volumes gebaggerd materiaal voor twee locaties bij Beheersdoel B150.



Figuur 4-6. Ruimtelijke verdeling van totale volumes aan gebaggerd (boven) en gestort materiaal (onder) bij Beheersdoel B150.



Figuur 4-7. Verschillen in bodemligging tussen de situatie met Beheersdoel B150 en de referentiesituatie zonder baggeren, op tijdstippen aan het einde van de baggerperiodes (km 867-891).

Figuur 4-5 laat het tijdsafhankelijke verloop zien van het baggeren op de twee locaties. Na drie jaar stopt het baggeren in KM_ 870, terwijl het baggeren in KM_885 juist steeds toeneemt. Dit leidt ertoe dat ook de totale jaarlijkse baggerhoeveelheden toenemen (Figuur 4-6). Figuur 4-7 toont gedurende 5 jaar de verschillen in bodemligging tussen de situatie met Beheersdoel B150 en de referentiesituatie zonder baggeren. Deze figuur bevestigt dat baggeren plaatsvond in de desbetreffende vakken en dat het gebaggerde materiaal gestort werd in de diepere delen van dezelfde vakken. Bovendien geeft deze figuur aan dat er buiten deze vakken nauwelijks verschillen in bodemligging zijn. Dat betekent dat het baggeren en storten geen grootschalige morfologische respons opwekken in zones buiten de vakken voor baggeren en storten.

4.2.3 Beheersdoel B170

Beheersdoel B170 betreft een vaarwegprofiel van 2,8 m × 170 m. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4-2, waaruit blijkt dat op 17 plaatsen gebaggerd wordt met een totaal volume van 700.456 m^3 gedurende een periode van 5 jaar. De bijbehorende kosten bedragen 1.961.276 euro over de periode van 5 jaar. Figure 4-8 tot en met Figure 4-10 tonen de resultaten. Wederom blijkt dat het baggeren op een aantal plaatsen na verloop van tijd stopt maar op andere plaatsen toeneemt. Baggerwerkzaamheden strekken zich nu uit over vrijwel het gehele traject van km 870 tot km 890.

Tabel 4-2. Resultaten voor Beheersdoel B170.

```
1. dredging from: KM_909, dumping into: dump_KM_909, V =  4239.9 m3
2. dredging from: KM_897, dumping into: dump_KM_897, V =     616 m3
3. dredging from: KM_896, dumping into: dump_KM_896, V =   618.2 m3
4. dredging from: KM_895, dumping into: dump_KM_895, V =   606.7 m3
5. dredging from: KM_894, dumping into: dump_KM_894, V =   604.8 m3
6. dredging from: KM_885, dumping into: dump_KM_885, V = 67788.3 m3
7. dredging from: KM_884, dumping into: dump_KM_884, V = 69519.3 m3
8. dredging from: KM_883, dumping into: dump_KM_883, V = 69314.5 m3
9. dredging from: KM_881, dumping into: dump_KM_881, V = 27531.8 m3
10. dredging from: KM_878, dumping into: dump_KM_878, V = 20208.8 m3
11. dredging from: KM_877, dumping into: dump_KM_877, V = 27397.8 m3
12. dredging from: KM_876, dumping into: dump_KM_876, V =   609.7 m3
13. dredging from: KM_875, dumping into: dump_KM_875, V =157055.8 m3
14. dredging from: KM_874, dumping into: dump_KM_874, V =142948.8 m3
15. dredging from: KM_873, dumping into: dump_KM_873, V =    1794 m3
16. dredging from: KM_870, dumping into: dump_KM_870, V = 69587.7 m3
17. dredging from: KM_869, dumping into: dump_KM_869, V = 40013.5 m3
```

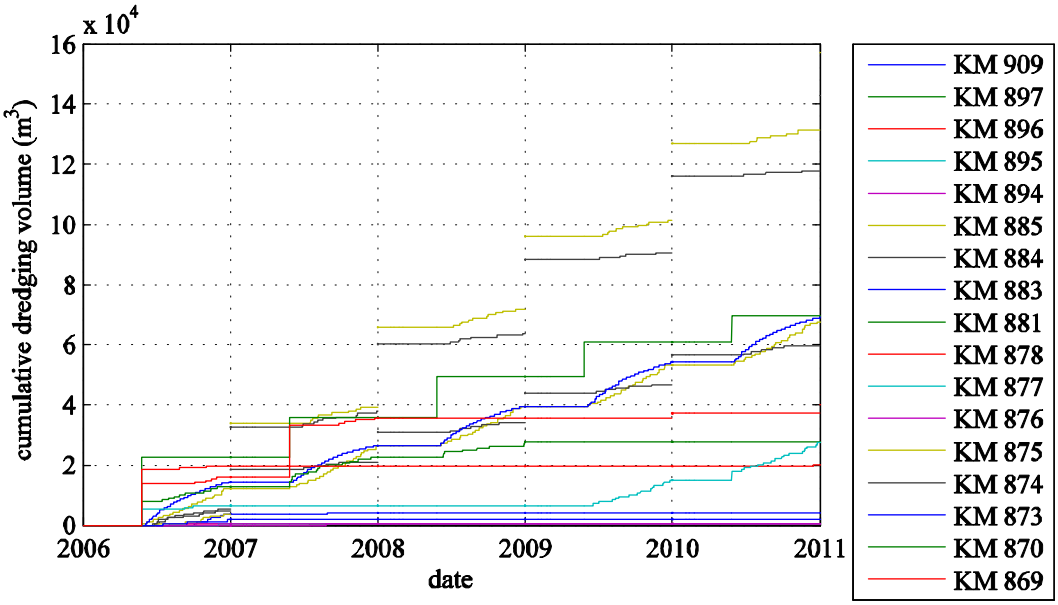


Figure 4-8. Cumulatief verloop van volumes gebaggerd materiaal voor 17 locaties bij Beheersdoel B170.

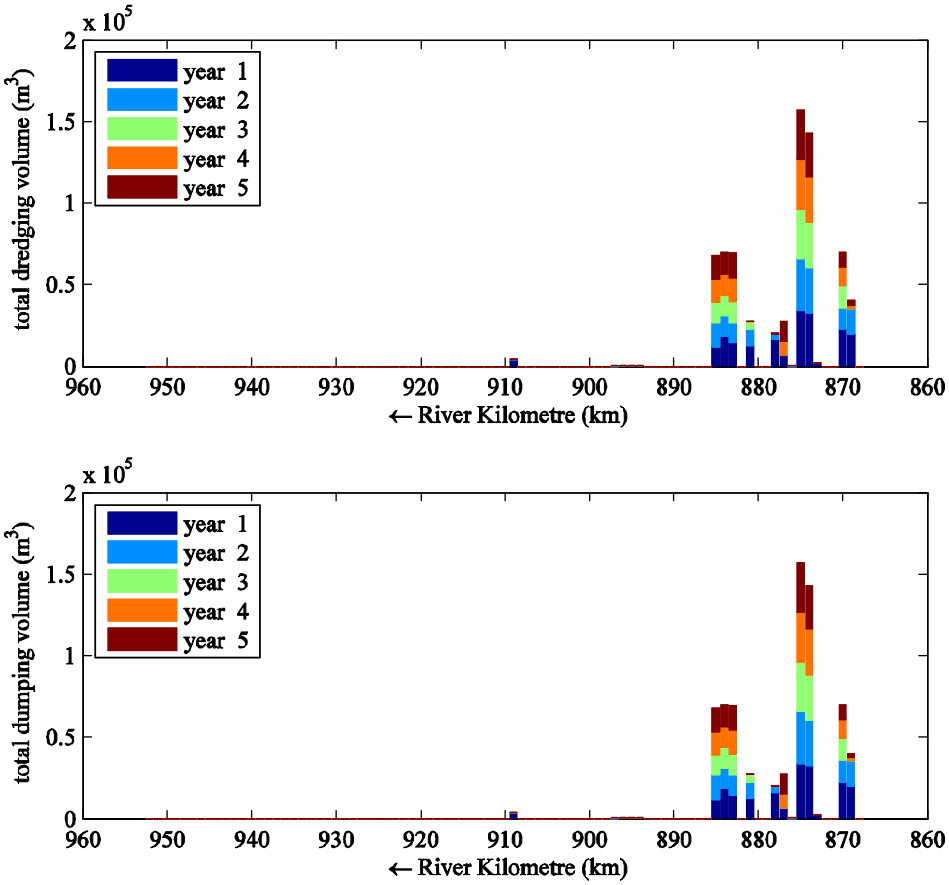


Figure 4-9. Ruimtelijke verdeling van totale volumes aan gebaggerd (boven) en gestort materiaal (onder) bij Beheersdoel B170.

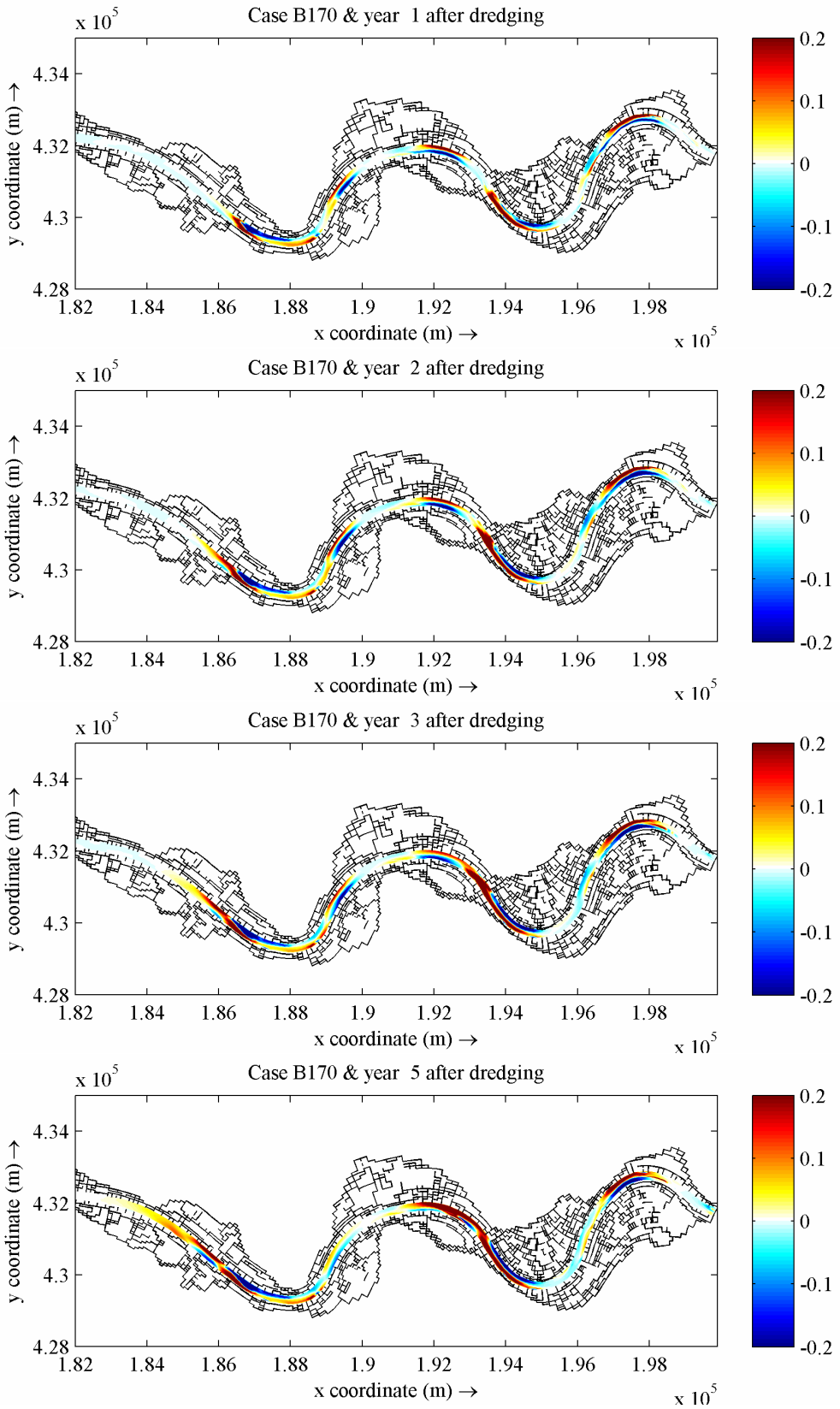


Figure 4-10. Verschillen in bodemligging tussen de situatie met Beheersdoel B170 en de referentiesituatie zonder baggeren, op tijdstippen aan het einde van de baggerperiodes (km 867-891).

4.2.4 Beheersdoel B152

Beheersdoel B152 betreft een vaarwegprofiel van 2,8 m × 150 m. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4-3, waaruit blijkt dat op 13 plaatsen gebaggerd wordt met een totaal volume van 293.538 m^3 gedurende een periode van 5 jaar. De bijbehorende kosten bedragen 821.908 euro over de periode van 5 jaar. Figuur 4-11 tot en met Figuur 4-13 tonen de resultaten. Deze liggen tussen die voor de Beheersdoelen B150 en B170, maar meer aan de kant van B170 dan B150.

Tabel 4-3. Resultaten voor Beheersdoel B152.

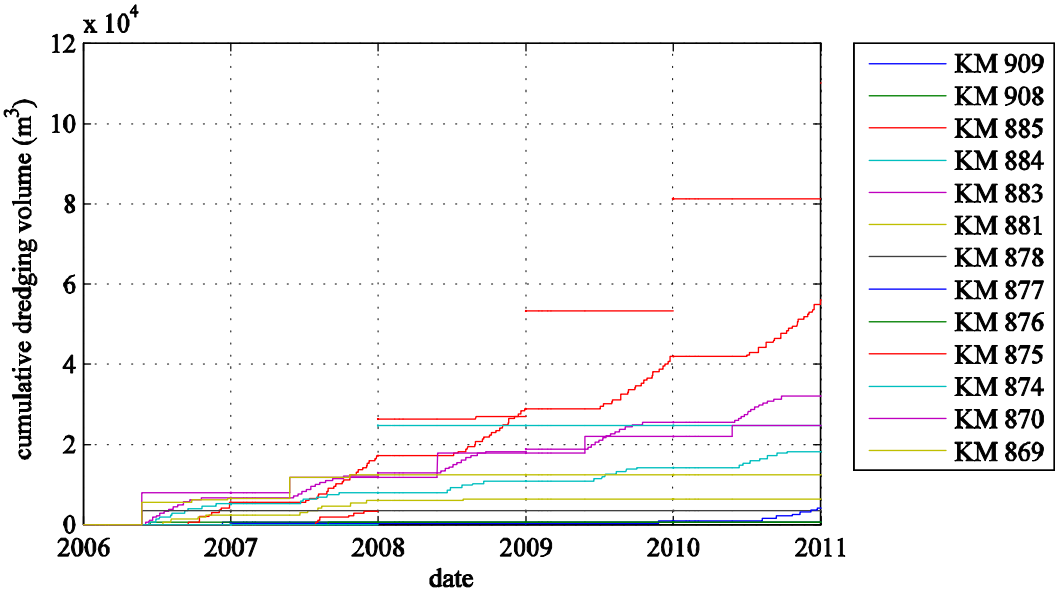
```
1. dredging from: KM_909, dumping into: dump_KM_909, V =   565.5 m3
2. dredging from: KM_908, dumping into: dump_KM_908, V =     613 m3
3. dredging from: KM_885, dumping into: dump_KM_885, V = 55941.8 m3
4. dredging from: KM_884, dumping into: dump_KM_884, V = 18178.2 m3
5. dredging from: KM_883, dumping into: dump_KM_883, V = 31894.1 m3
6. dredging from: KM_881, dumping into: dump_KM_881, V =  6360.5 m3
7. dredging from: KM_878, dumping into: dump_KM_878, V =  3454.7 m3
8. dredging from: KM_877, dumping into: dump_KM_877, V =  4155.3 m3
9. dredging from: KM_876, dumping into: dump_KM_876, V =   565.8 m3
10. dredging from: KM_875, dumping into: dump_KM_875, V =110235.6 m3
11. dredging from: KM_874, dumping into: dump_KM_874, V = 24639.4 m3
12. dredging from: KM_870, dumping into: dump_KM_870, V = 24580.1 m3
13. dredging from: KM_869, dumping into: dump_KM_869, V = 12354.7 m3
```

4.3 Discussie

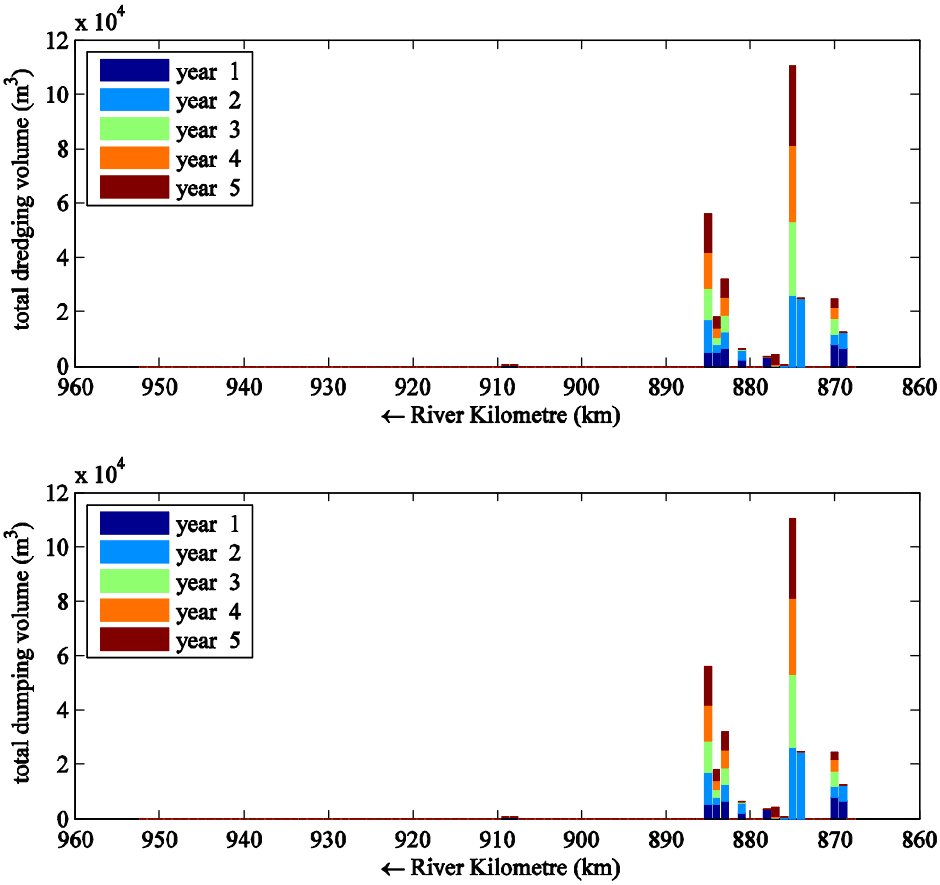
De meeste baggerwerkzaamheden blijken op te treden in het meest bovenstroomse traject. De kosten van Beheersdoel B170 liggen een factor 16 hoger dan de kosten van het vigerende Beheersdoel B150. Hiervan is een factor 6,8 toe te schrijven aan de grotere vaarwegdiepte en een factor 2,4 aan de grotere vaarwegbreedte.

Veldgegevens uit de periode 1990-1996 leren dat op de Waal in 5 jaar 1.678.583 m^3 gebaggerd is (Van Vuren & Sloff, 2006). Rond 60% daarvan is gebaggerd op de Beneden-Waal tussen km 915 en km 951. Dit wordt niet door het model gereproduceerd. Mogelijk is dit te verklaren doordat geen gebruik gemaakt is van de duinhoogtevoorspeller en de functionaliteit om bij het baggeren met duinen rekening te houden. Het kan echter ook zijn dat de toegepaste schematisatie herzien moet worden.

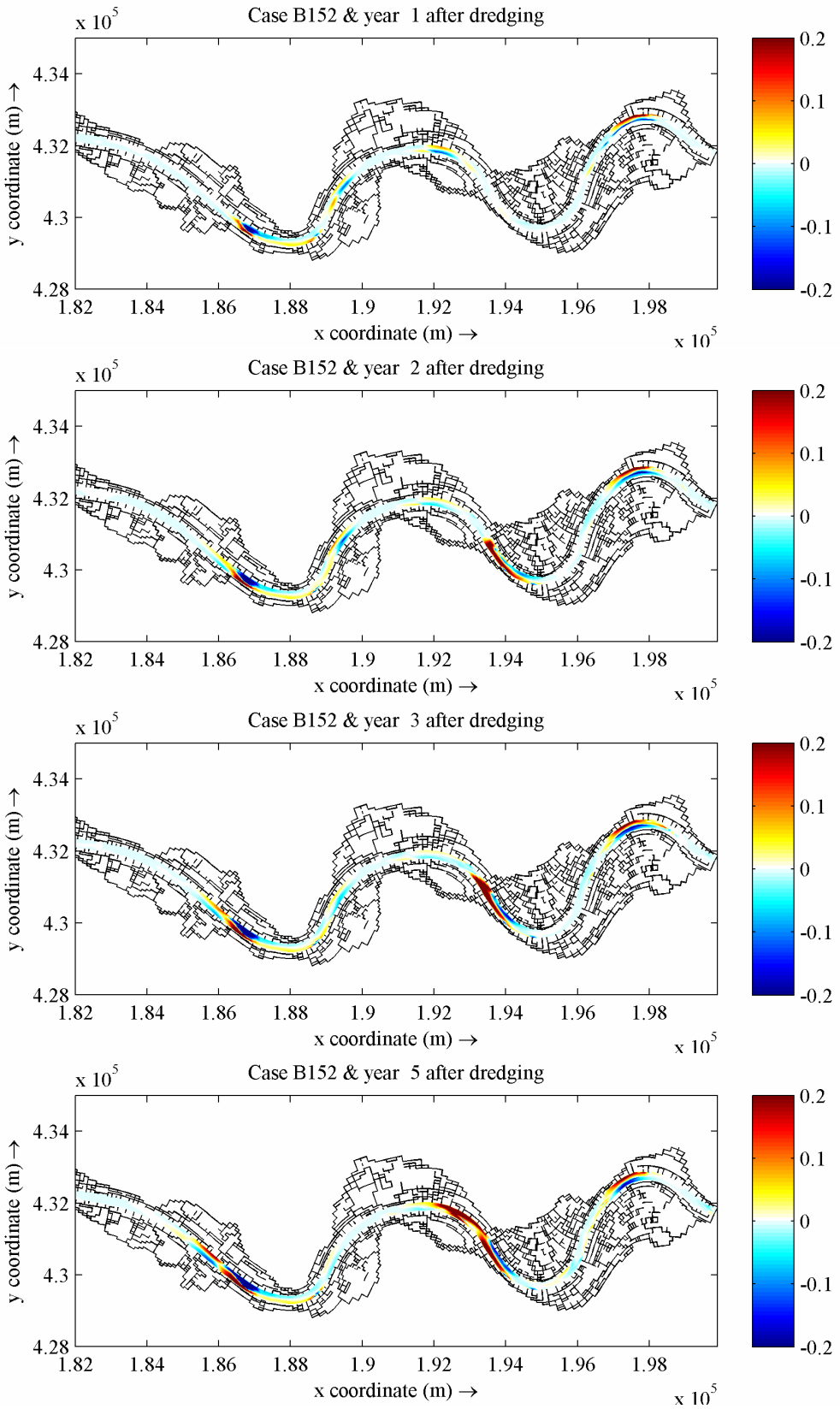
De met een afvoer van 818 m^3/s berekende OLR was gemiddeld 0,25 m hoger dan de vastgestelde OLR van 2002 (Figuur 4-14). Deze afwijking zou gecorrigeerd kunnen worden met een 7% hogere waarde van de Chézycoëfficiënt.



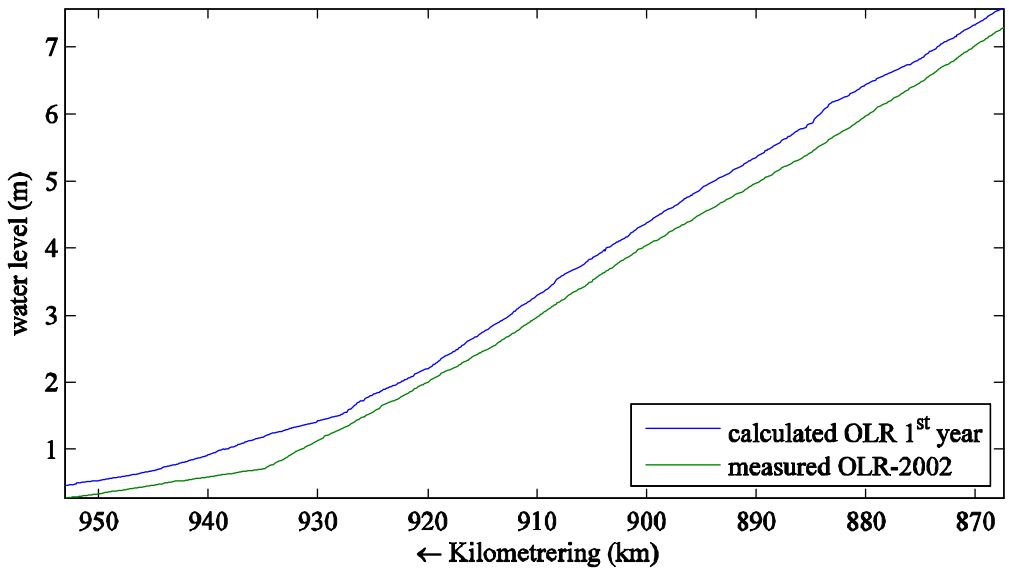
Figuur 4-11. Cumulatief verloop van volumes gebaggerd materiaal voor 13 locaties bij Beheersdoel B152.



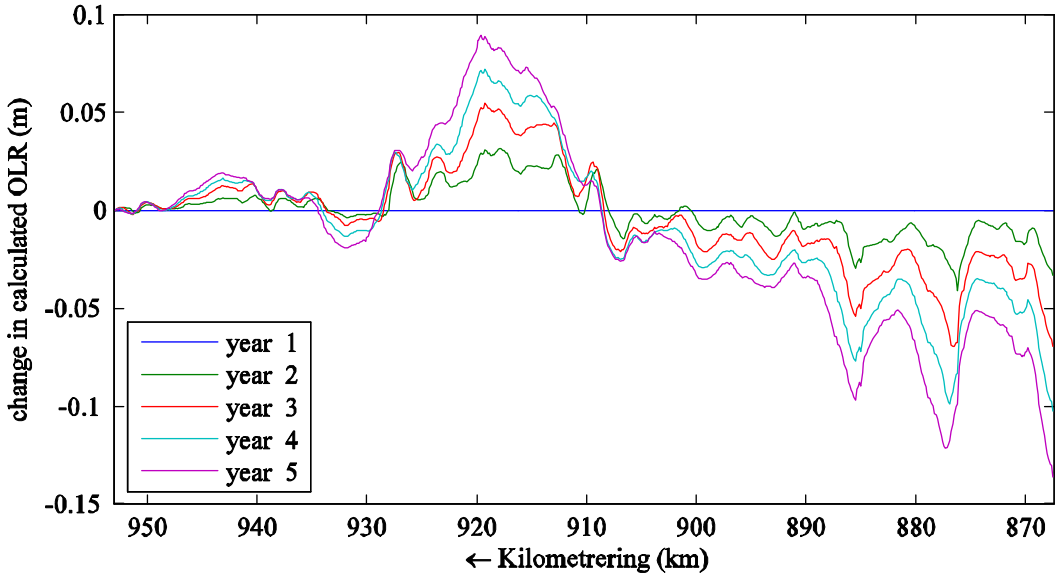
Figuur 4-12. Ruimtelijke verdeling van totale volumes aan gebaggerd (boven) en gestort materiaal (onder) bij Beheersdoel B152.



Figuur 4-13. Verschillen in bodemligging tussen de situatie met Beheersdoel B152 en de referentiesituatie zonder baggeren, op tijdstippen aan het einde van de baggerperiodes (km 867-891).



Figuur 4-14. Vergeleken tussen vastgestelde en berekende OLR.



Figuur 4-15. Veranderingen in de berekende OLR ten opzichte van de aan het einde van het eerste jaar berekende waarden.

De berekende OLR verandert aanzienlijk gedurende de simulatie van vijf jaar (Figuur 4-15). De OLR daalt op het traject km 868-908 en stijgt op het traject km 908-930. Alleen aan de benedenrand verandert de OLR niet, maar dat is louter het gevolg van de voorgeschreven randvoorwaarde.

Figuur 5-4 laat zien dat het genereren van modeluitvoer na kleine intervallen het verloop van de baggerwerkzaamheden en de bodemligging beter beschrijft. Dergelijke kleine intervallen vertragen echter de berekening en produceren zeer omvangrijke uitvoerbestanden.

De verbeterde functionaliteit voor baggeren blijkt in principe een sterk en flexibel hulpmiddel te zijn voor het evalueren van verschillende baggerstrategieën. Vooralsnog is de betrouwbaarheid van de resultaten echter nog gering. Aanbevolen wordt daarom om voorlopig de resultaten van dit hulpmiddel alleen in relatieve, vergelijkende zin te gebruiken en niet in absolute zin.

5 Casestudy C: suppletieproef

5.1 Aanpak

5.1.1 Overzicht van berekeningen

Rijkswaterstaat bereidt een suppletieproef op de Bovenrijn voor om te onderzoeken in hoeverre sedimentsuppleties gebruikt kunnen worden om de bodemdaling van de Bovenrijn een halt toe te roepen. De achterliggende gedachte is dat suppleties lokaal de bodem rechtstreeks stabiliseren, stroomopwaarts sedimentatie bevorderen door opstuwing en stroomafwaarts erosie tegengaan door vergroting van de sedimentvracht. Casestudy C betreft het simuleren van de morfologische effecten van dergelijke suppletieproeven.

De suppletieproeven zijn gesimuleerd met het in Hoofdstuk 2 gekalibreerde model van de Bovenrijn. Voor het gegradeerde sediment in dit model zijn eerst *gevoeligheidsberekeningen* uitgevoerd waarbij de actieve-laagdikte en het aantal fracties gevarieerd zijn. De actieve-laagdikte is een van de voornaamste kalibratieparameters in de modellering van transportprocessen van gegradeerd sediment. De variatie van het aantal fracties beoogde na te gaan wat het effect is van de in Paragraaf 2.2.2 toegepaste verwijdering van de twee fracties grover dan 32 mm. Net als bij de kalibratie is de voortplanting en de afbraak van twee sedimentbulten gevolgd.

Aansluitend zijn *referentieberekeningen* zonder suppleties uitgevoerd voor verschillende actieve-laagdiktes. Deze maken het mogelijk om, bij verschillende actieve-laagdiktes, de verschillen tussen situaties met en zonder suppletie te analyseren. Tenslotte zijn de eigenlijke *suppletieberekeningen* uitgevoerd. Tabel 5-1 geeft een overzicht.

Tabel 5-1. Overzicht van berekeningen voor casestudy C.

Nr.	Aard	Suppletie			Actieve laagdikte (m)	Aantal fracties	Afvoer (m^3/s)
		volume (m^3)	samenstelling	frequentie			
1	gevoeligheid	-	-	-	0,1	8	2500
2	gevoeligheid	-	-	-	0,5	8	2500
3	gevoeligheid	-	-	-	1,5	8	2500
4	gevoeligheid	-	-	-	1,5	10	2500
5	referentie	-	-	-	0,5	8	hydrograaf
6	referentie	-	-	-	1,5	8	hydrograaf
7	referentie	-	-	-	f(afvoer)	8	hydrograaf
8	suppletie	2 × 150.000	initiële bodem	eenmalig	1,5	8	hydrograaf
9	suppletie	2 × 300.000	initiële bodem	eenmalig	1,5	8	hydrograaf
10	suppletie	2 × 150.000	10% grover	eenmalig	1,5	8	hydrograaf
11	suppletie	2 × 150.000	25% grover	eenmalig	1,5	8	hydrograaf
12	suppletie	2 × 150.000	initiële bodem	jaarlijks	1,5	8	hydrograaf
13	suppletie	2 × 150.000	initiële bodem	eenmalig	0,5	8	hydrograaf
14	suppletie	2 × 150.000	initiële bodem	eenmalig	f(afvoer)	8	hydrograaf

Overeenkomstig de beoogde suppletieproef, is het sediment in de suppletieberekeningen gestort in twee buitenbochten van de Bovenrijn: in de rechter buitenbocht tussen km 858 en km 861 en in de linker buitenbocht tussen km 861 en km 864. In de basisvariant geldt voor elke bocht een suppletievolume van 150.000 m^3 en een suppletiesamenstelling die gelijk is aan de gemiddelde initiële bodemsamenstelling van het modelgebied. In twee berekeningen is het gesuppleerde materiaal grover gemaakt door de fijnste fracties eruit te verwijderen en het aandeel van deze fracties evenredig te verdelen over de overige fracties. Een vergroving van 10% is bereikt door verwijdering van 1 fractie, een vergroving van 25% door de verwijdering van 2 fracties.

5.1.2 Schematisatie van de maatregel

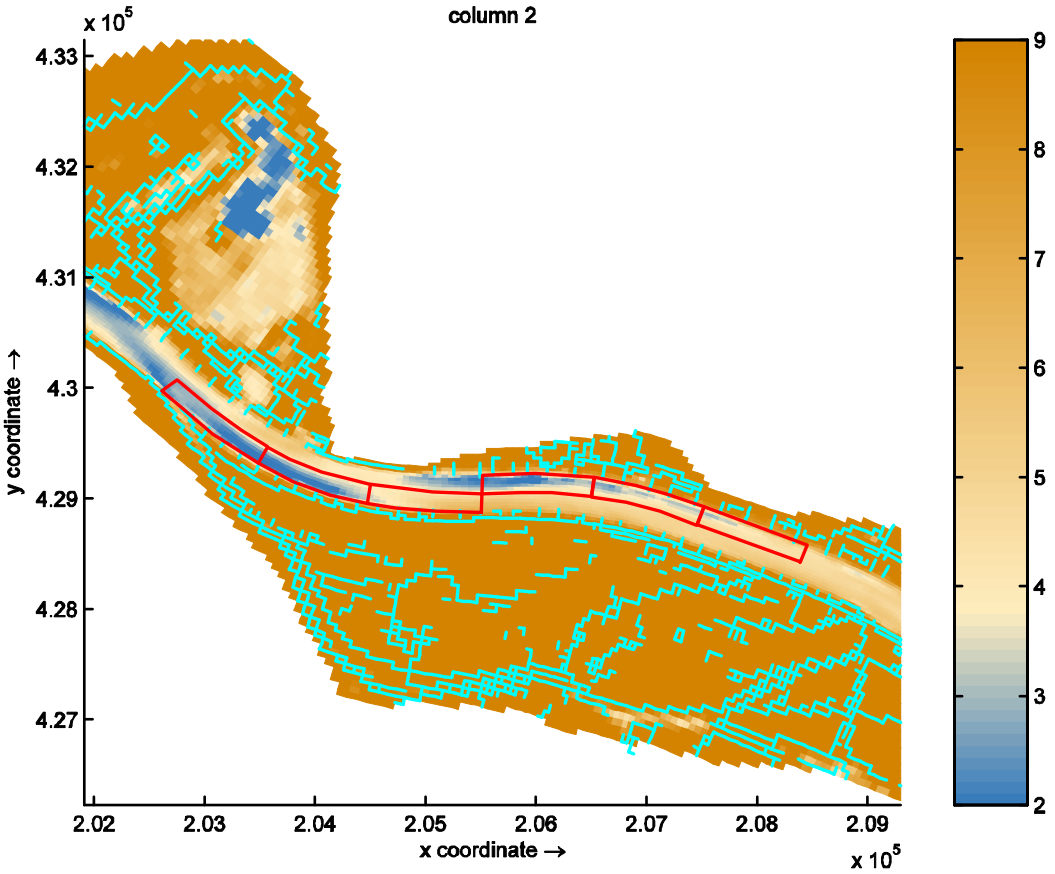
De polygonen in Figuur 5-1 geven de locaties van de suppleties weer. Met uitzondering van de jaarlijks herhaalde suppletie in berekening 12 zijn alle suppleties eenmalig, instantaan aan het begin van de berekening aangebracht. De ruimtelijke verspreiding van het gesuppleerde materiaal is gevolgd door hiervoor een aparte korrelgroottefractie te definiëren, die initieel overal 0 % aanwezig is, behalve op de plek waar gesuppleerd wordt. Er worden dus geen individuele deeltjes gevolgd, maar hoeveelheden tracermateriaal in een formulering die past in het modelconcept. De implementatie in het model laat het toe om fracties willekeurig ten opzichte van elkaar te definiëren. Fracties mogen aansluiten of overlappen. Daardoor is het mogelijk om bijvoorbeeld twee sedimentfracties met allebei diameters van 1 tot 2 mm te definiëren, de ene fractie als aanwezig bodemmateriaal, de andere als gesuppleerde tracer. Testen hebben aangetoond dat bij een initiële 50%-50% verdeling en identieke fractiekarakteristieken, de gelijke verdeling gedurende de gehele simulatie gehandhaafd blijft, zonder uitzeving.

5.1.3 Afvoerhydrograaf

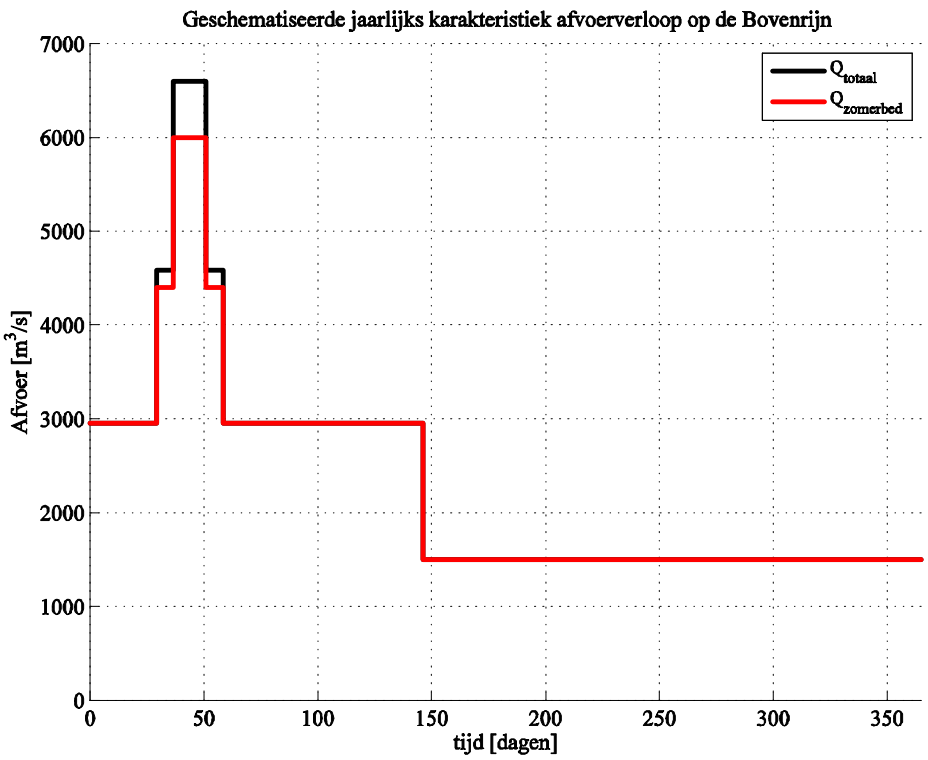
Het geschematiseerde afvoerverloop op de Waal van het referentiescenario uit Paragraaf 3.1.4 is vertaald naar een karakteristiek afvoerverloop op de Bovenrijn. Dit afvoerverloop is weergegeven in Figuur 5-2 en Tabel 5-2. Om de rekentijd te reduceren, zijn de suppletieberekeningen uitgevoerd met het versmalde rekenrooster dat ook in de kalibratieberekeningen is gebruikt. Daartoe is per afvoerniveau een afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed vastgesteld, die eveneens is weergegeven in Figuur 5-2 en Tabel 5-2. De afvoertijdreeks wordt op de bovenrand van het model opgelegd en wordt in langere simulaties jaarlijks herhaald. Voor de afvoeren van 1500 m^3/s en 2954 m^3/s is een morfologische factor van 10 gebruikt, overeenkomstig de kalibratie in Hoofdstuk 2. Voor de twee hogere afvoeren is een morfologische factor van 5 toegepast.

5.1.4 Grootschalige bodemdaling

De grootschalige of “autonome” bodemdaling wordt op de benedenrand opgelegd als een voortschrijdende daling van de waterstand-afvoerrelatie die voor elke afvoer de bijbehorende waterstand geeft. Voor de beginsituatie zijn deze waterstanden afgeleid uit de vereffende afvoerverdeling Rijntakken 2000. Voor een daaropvolgende periode van 10 jaar zijn deze waterstanden berekend met het 1D Rijntakkenmodel in SOBEK. Voor ieder afvoerniveau uit de hydrograaf zijn de beginwaterstanden in Tabel 5-2 weergegeven.



Figuur 5-1. Stortlocaties voor suppletieproef in Bovenrijn (rode polygonen, km 858-864).



Figuur 5-2. Geschematiseerd jaarlijks karakteristiek afvoerverloop.

Tabel 5-2. Geschematiseerd jaarlijks afvoerverloop (bovenrandvoorwaarde) en geschematiseerde grootschalige waterstandsdaling (benedenrandvoorwaarde).

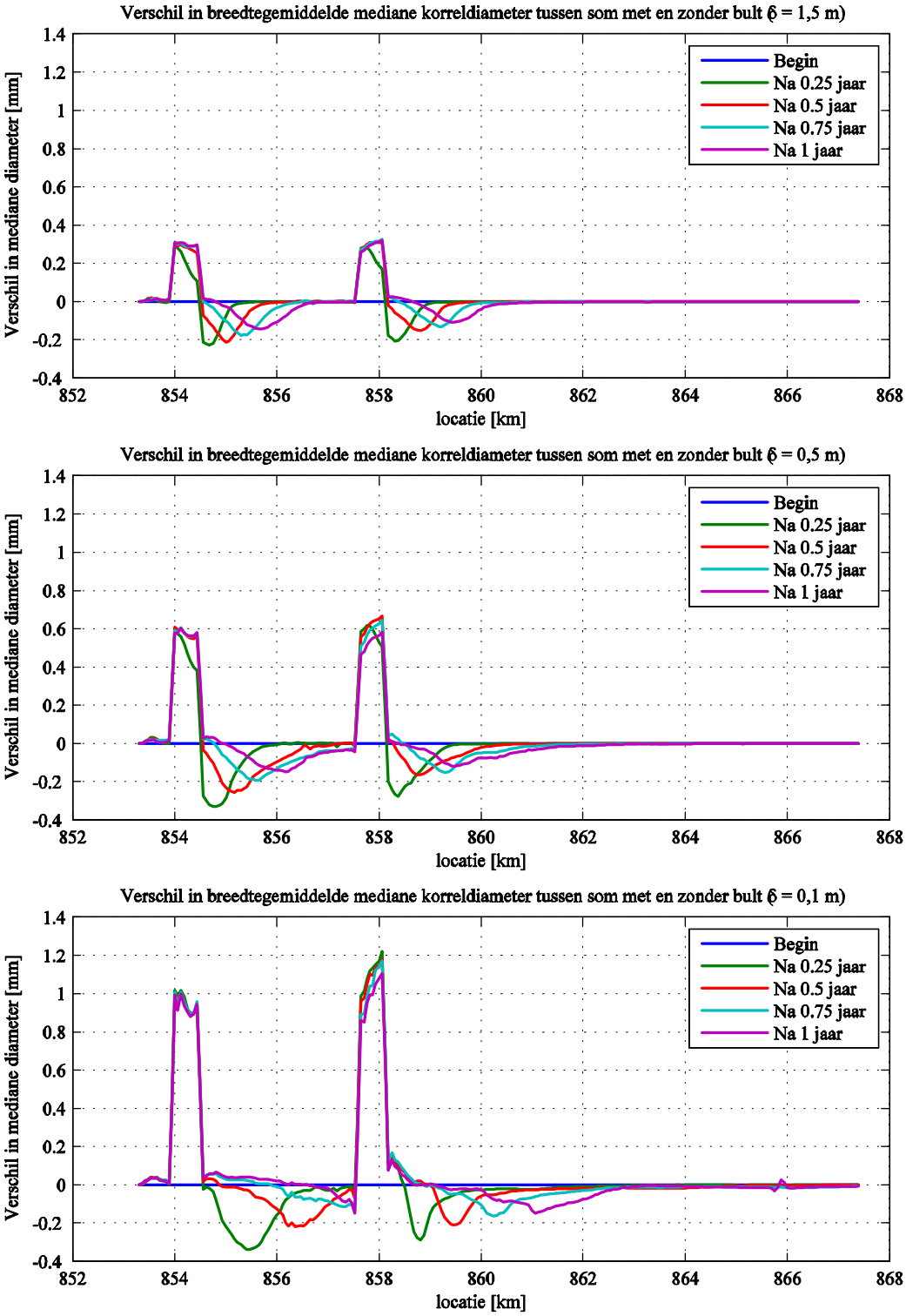
Aantal dagen per jaar	Afvoer (m^3/s)		Waterstand (m + NAP)	Waterstandsdaling (mm/jaar)
	totaal	zomerbed		
30	2954	2954	10,41	18
8	4583	4400	12,15	16
14	6598	6000	13,67	14
8	4583	4400	12,15	16
86	2954	2954	10,41	18
219	1500	1500	8,43	25

5.2 Resultaten van gevoeligheidsberekeningen

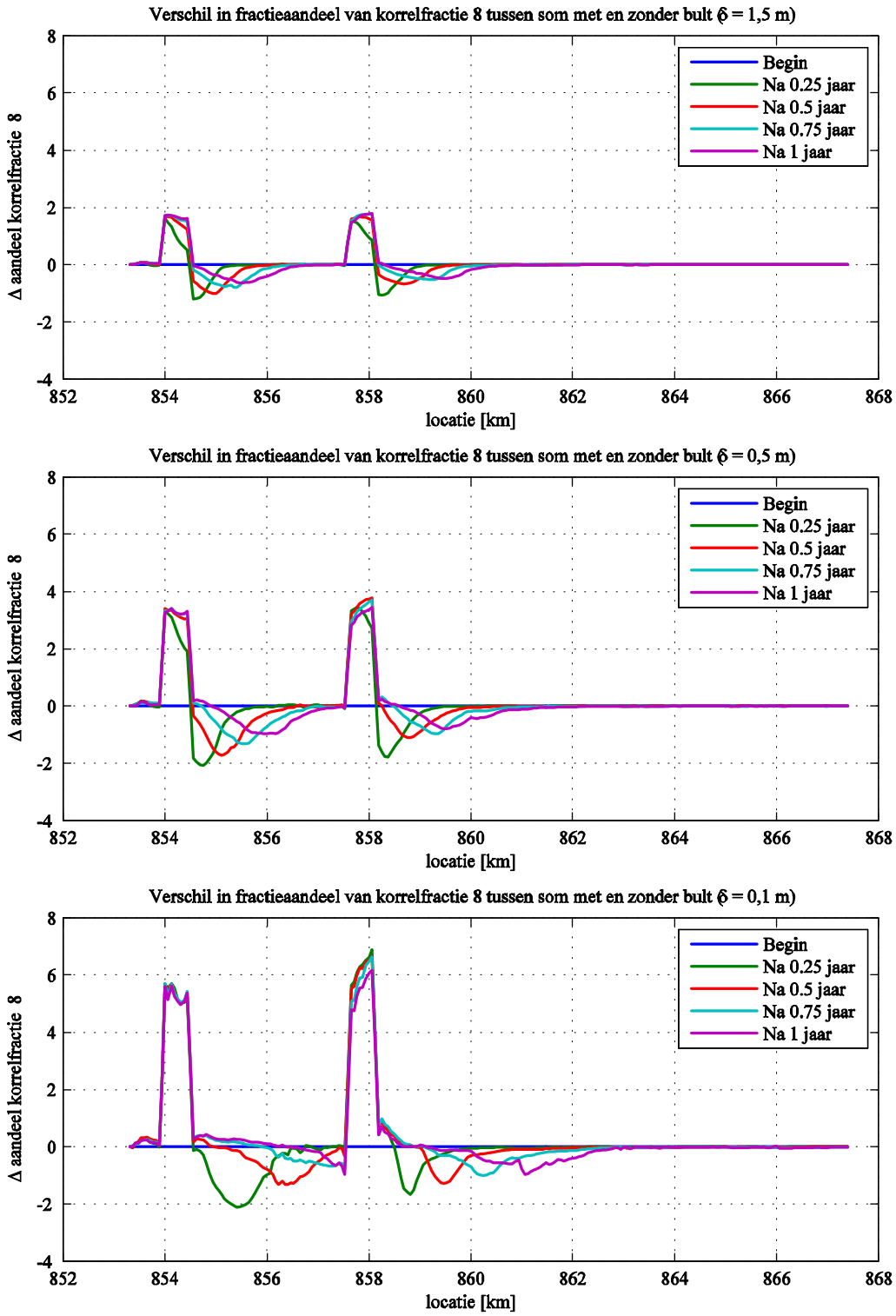
5.2.1 Invloed van de actieve laagdikte

Het effect van de dikte van de actieve laag op de sedimentsamenstelling is te zien in Figuur 5-3 en Figuur 5-4. Figuur 5-3 toont hoe de veranderingen in de sedimentsamenstelling tot uitdrukking komen in de mediane sedimentdiameter. Uit de figuur blijkt dat de toplaag ter plaatse van de bult grover wordt, terwijl de samenstelling direct achter de bult fijner wordt. Een dunnere actieve laag leidt tot een grover sedimentmengsel ter plaatse van de bult en een snellere aanpassing van de sedimentsamenstelling. Figuur 5-4 toont het effect van de laagdikte op het aandeel van de grofste korrelfractie (fractie 8) in de toplaag. Dit aandeel neemt voor de laagdikte van 0,1 m met 5-6 % toe, terwijl het voor de laagdikte van 1,5 m slechts 2% toeneemt. Ook hieruit blijkt dat een dunnere actieve laag leidt tot een grover sedimentmengsel in de toplaag.

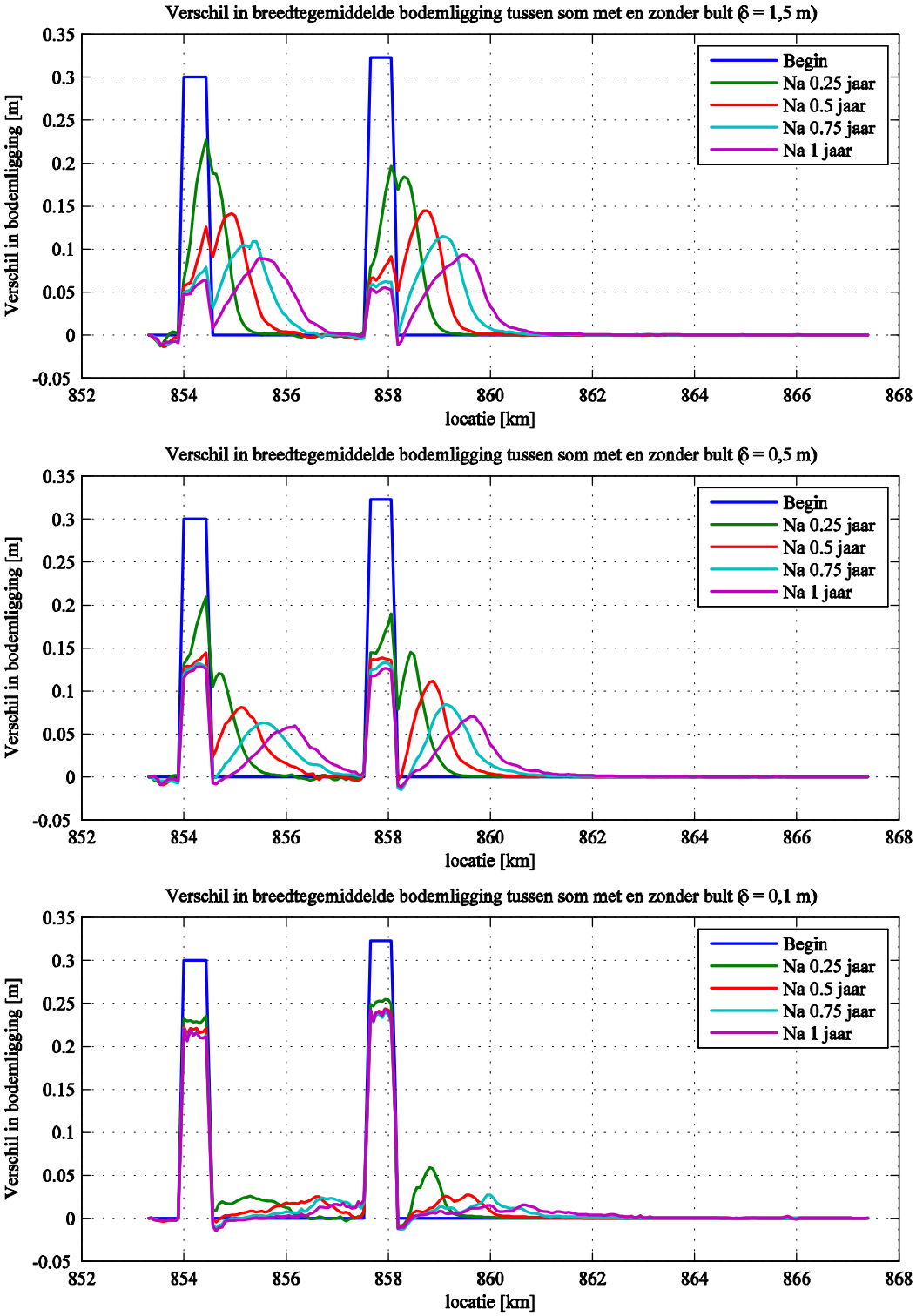
Figuur 5-5 geeft voor verschillende laagdikten de voortplanting van de bulten weer. Deze is sneller naarmate de actieve laag dunner is. Opvallend is dat de bulten niet geheel verdwijnen. Hoe kleiner de laagdikte, des te groter is de bult die overblijft. Met het stroomafwaarts verplaatsen van de bulten komt het fijne materiaal in beweging en blijft het grove sediment achter. Het aandeel van de grove fractie neemt toe, waardoor er een pleisterlaag ontstaat. Als tijdens erosie een snelle vergroving van de toplaag optreedt, dan zal het erosieproces door de afpleistering veel eerder stoppen dan wanneer deze vergroving slechts geleidelijk gaat. Dit verklaart het verschil in de grootte van de bult die overblijft bij laagdiktes van 0,1 m en 1,5 m. Daarmee beïnvloedt de dikte van de actieve laag niet alleen de bodemsamenstelling, maar ook de bodemligging.



Figuur 5-3. Verandering in mediane korreldiameter bij voortplanting van twee sedimentbulten over een periode van 1 jaar voor laagdiktes van 0,1 m, 0,5 m en 1,5 m.



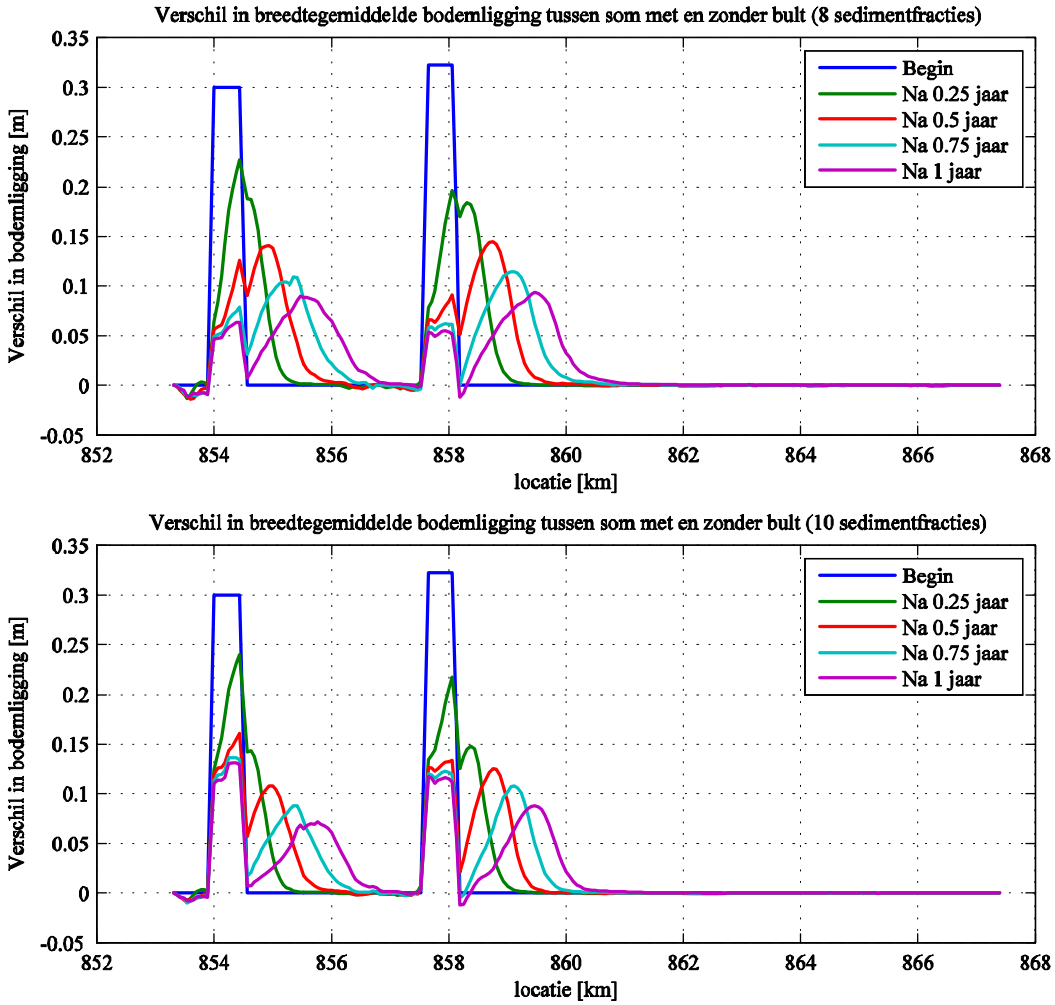
Figuur 5-4. Verschil in aandeel van korrelfractie 8 tussen situaties zonder en met bult over een periode van 1 jaar voor laagdiktes van 0,1 m, 0,5 m en 1,5 m.



Figuur 5-5. Verschil in bodemligging tussen situaties met en zonder bult over een periode van 1 jaar voor laagdiktes van 0,1 m, 0,5 m en 1,5 m.

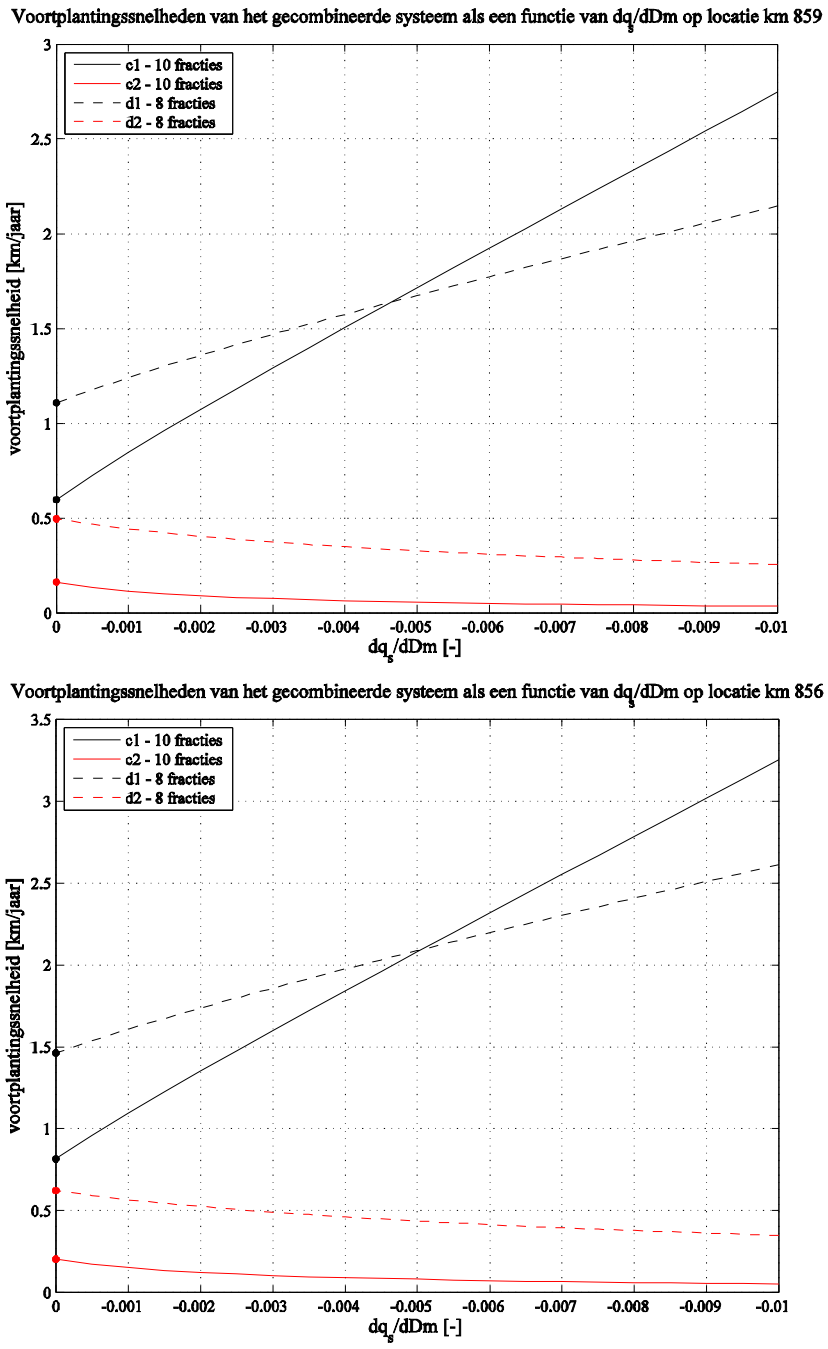
5.2.2 Invloed van het aantal sedimentfracties

Bij de kalibratie in Hoofdstuk 2 zijn de grofste sedimentfracties tussen 32 mm en 128 mm uit het model verwijderd, omdat deze fracties bij de hoogste afvoer uit de hydrograaf niet in beweging blijken te komen. Door die verwijdering veranderen echter ook de blootstellingscorrecties ("*hiding and exposure*") van de overige fracties, zodat het morfologische gedrag hierdoor toch kan veranderen. Om dit te analyseren is een berekening uitgevoerd met een sedimentmengsel dat is uitgebreid met twee fracties: 32-64 mm en 64-128 mm. Het blijkt dat het sedimenttransport dan ruim halveert, doordat de mediane korreldiameter toeneemt en doordat fijnere fracties sterker worden afgeschermd. Opmerkelijk genoeg leidt het geringere transport echter niet tot een langzamere voortplanting van de sedimentbulten. Figuur 5-6 laat zien dat de voortplantingssnelheden in beide situaties ongeveer 1,5 km/jaar bedragen. Een nadere analyse leert dat dit te verklaren is uit een toename van het verschil in gemiddelde korrelgroottes tussen sediment in transport en sediment in de bodem. De basis hiervoor is een karakteristiekenanalyse in Bijlage A.



Figuur 5-6. Voortplanting van twee sedimentbulten over een periode van 1 jaar voor sedimentmengsels met 8 en met 10 fracties, bij een actieve-laagdikte van 1,5 m.

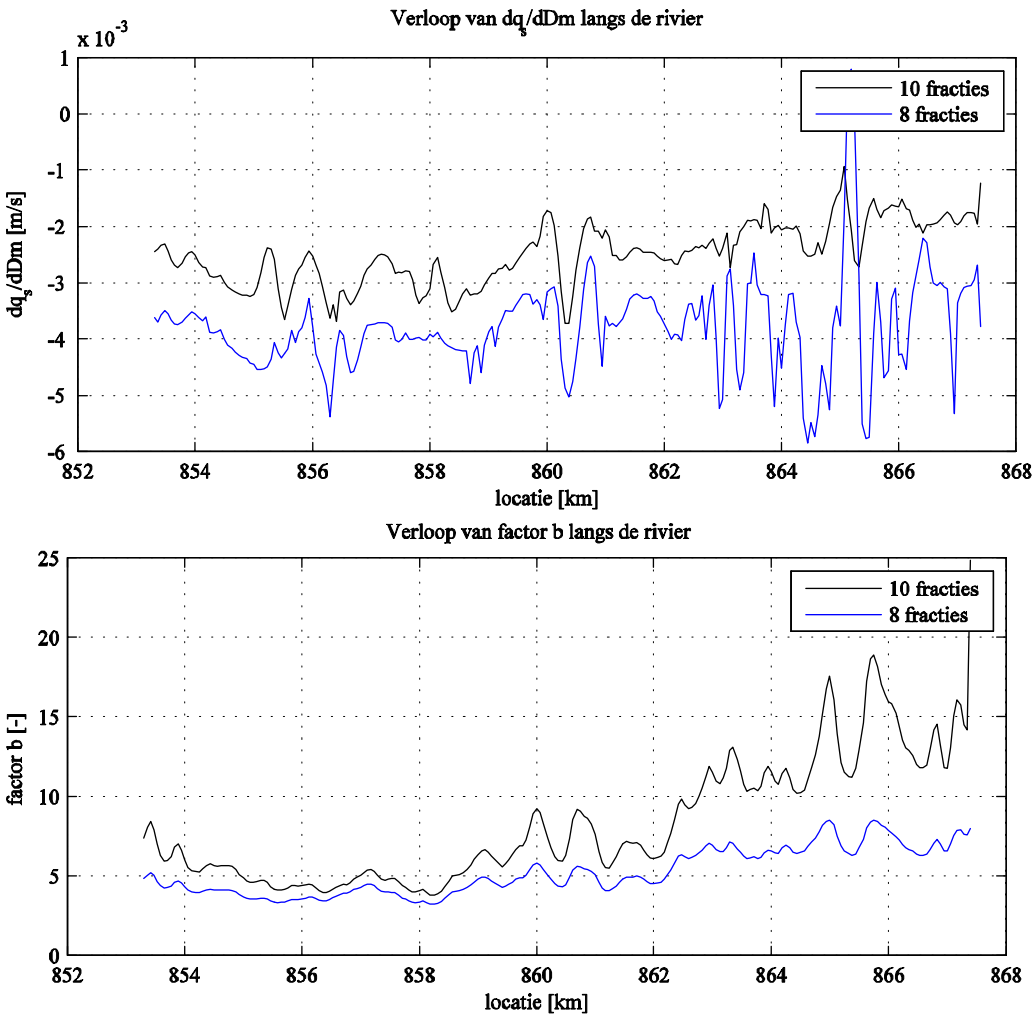
De Vergelijkingen (A-21) en (A-22) laten zien dat de voortplantingssnelheden beïnvloed worden door het verschil in gemiddelde korrelgroottes tussen sediment in transport en sediment in de bodem, $D_{mT} - D_m$, en de gevoeligheid van het sedimenttransport voor variaties in gemiddelde korrelgrootte, dq_s/dD_m. Het effect van een kleiner sedimenttransport als de grofste fracties worden meegenomen, wordt gecompenseerd door het effect van een groter verschil tussen de gemiddelde korrelgroottes van materiaal in transport en materiaal in de bodem.



Figuur 5-7. Voortplantingssnelheden van verstoringen in bodemligging en bodemsamenstelling voor het gecombineerde systeem als functie van dq_s/dD_m voor locaties km 856 en km 859.

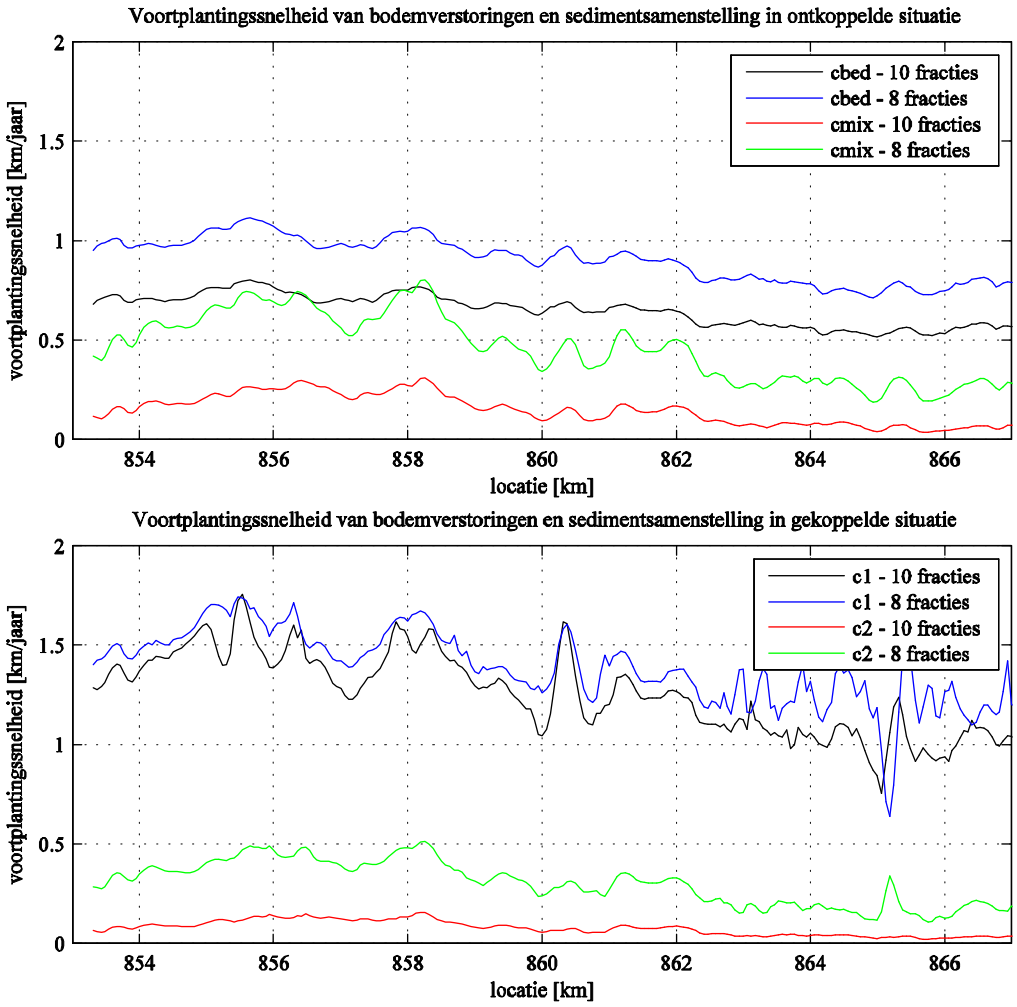
Figuur 5-7 kwantificeert voor km 856 en km 859 de voortplantingssnelheden van het gecombineerde systeem met 8 en 10 fracties als functie van dq_s/dD_m aan de hand van met Delft3D berekende parameterwaarden. De figuur laat zien dat er een waarde voor dq_s/dD_m bestaat waarvoor de voortplantingssnelheid c_1 van het gecombineerde stelsel voor de berekeningen met 8 en 10 sedimentfracties gelijk is ($c_1 = d_1$). Voor waarden van dq_s/dD_m beneden -0,005 ligt de voortplantingssnelheid c_1 van het gecombineerde stelsel voor de berekening met 10 fracties zelfs hoger dan voor de berekening met 8 fracties.

Figuur 5-8 geeft de waarden van dq_s/dD_m en de mate van niet-lineariteit b als functie van de locatie langs de rivier weer voor de berekeningen met 8 en 10 sedimentfracties. Daarbij zijn dq_s/dD_m en b numeriek bepaald met behulp van aanvullende Delft3D-berekeningen waarin de grenzen van de korrelfracties met 1% zijn verhoogd en de afvoer met 5 m^3/s is verhoogd. Aan de hand van deze waarden zijn de voortplantingssnelheden van bodemligging en bodemsamenstelling in het ontkoppelde en het gekoppelde systeem bepaald.



Figuur 5-8. Waarden van dq_s/dD_m en b langs de Bovenrijn voor de berekeningen met 8 en 10 sedimentfracties.

Figuur 5-9 toont deze voortplantingssnelheden als functie van de locatie langs de rivier. De figuur laat zien dat de voortplantingssnelheden in het ontkoppelde lager liggen dan in het gecombineerde systeem. Ook is te zien dat de voortplantingssnelheden van bodemverstoringen voor het grovere mengsel van 10 fracties lager zijn dan voor het fijnere mengsel van 8 fracties. De voortplantingssnelheden verschillen echter minder dan de factor twee tussen de bijbehorende sedimenttransporten, omdat de mate van niet-lineariteit *b* voor de berekening met 10 fracties hoger is dan die voor de berekening van 8 fracties.



Figuur 5-9. Voortplantingssnelheid van het gecombineerde systeem langs de Bovenrijn voor de berekeningen met 8 en 10 sedimentfracties.

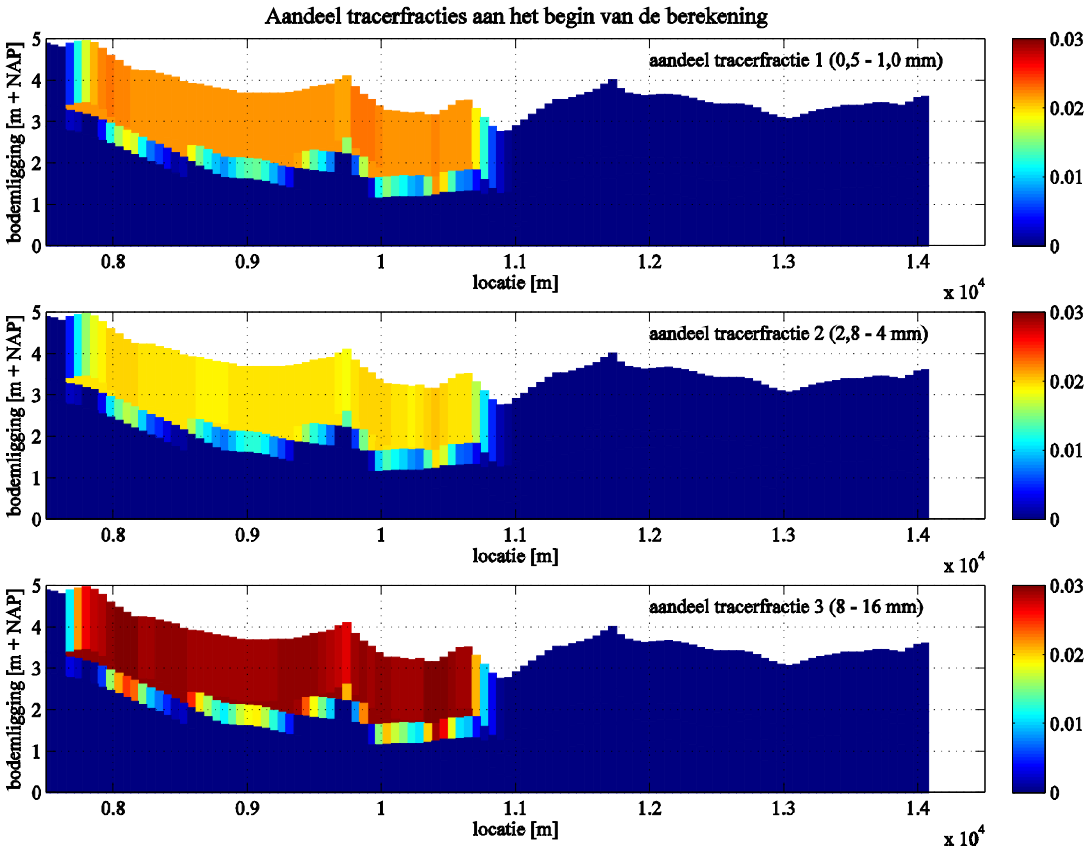
De aan de hand van de karakteristiekenanalyse berekende voortplantingssnelheden c_1 in Figuur 5-9 verklaren waarom de bulten in Figuur 5-6 zich in beide situaties ongeveer even snel verplaatsen. De effecten van een grotere gemiddelde korreldiameter en meer afscherming van de fijne fracties worden gecompenseerd door het effect van een groter verschil tussen de gemiddelde korrelgroottes van materiaal in transport en materiaal in de bodem.

5.3 Resultaten van suppletieberekeningen

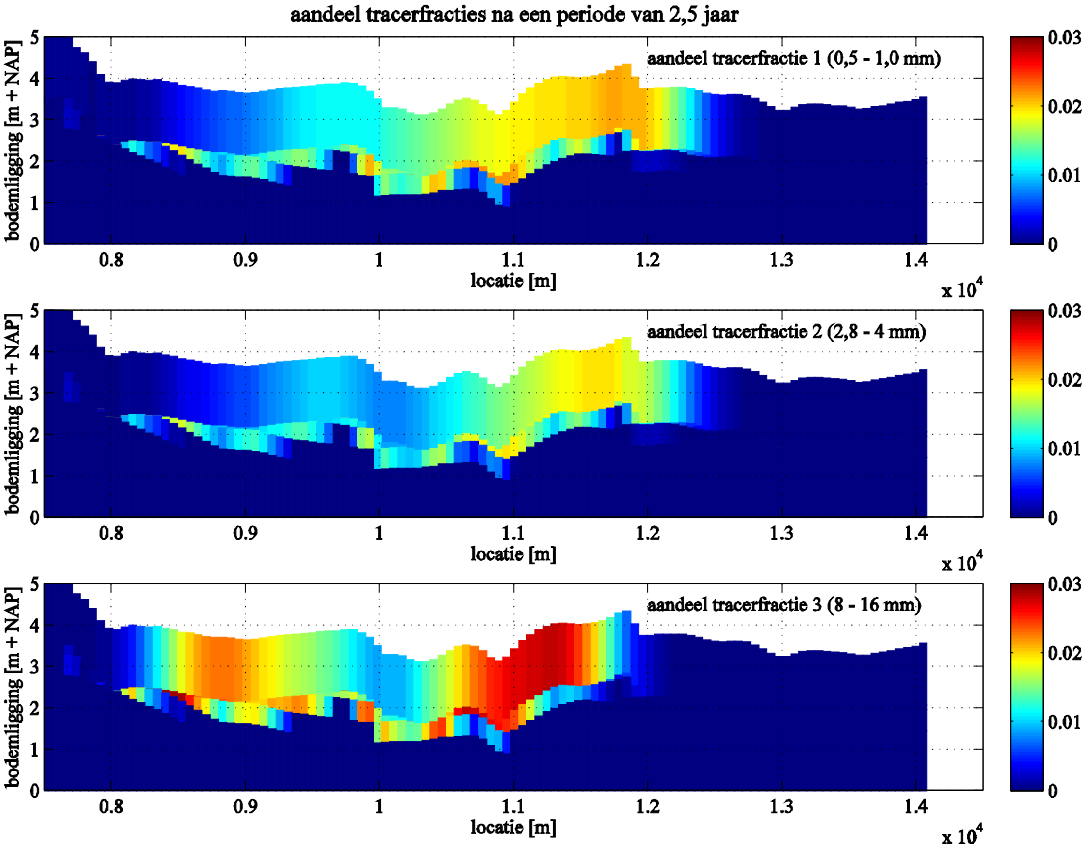
5.3.1 Effect op ruimtelijke verspreiding van suppletiemateriaal

Figuur 5-10 geeft voor Berekening 8 uit Tabel 5-1 een zijaanzicht van het aandeel van tracerfracties in de ondergrond van het suppletietraject tussen km 861 en 864 aan de linker buitenbocht aan het begin van de berekening. Om rekentijden te beperken is het aantal tracerfracties beperkt tot drie: een fijne tracerfractie van 0,5 tot 1 mm, een gemiddelde tracerfractie van 2,8 tot 4 mm en een grove tracerfractie van 8 tot 16 mm.

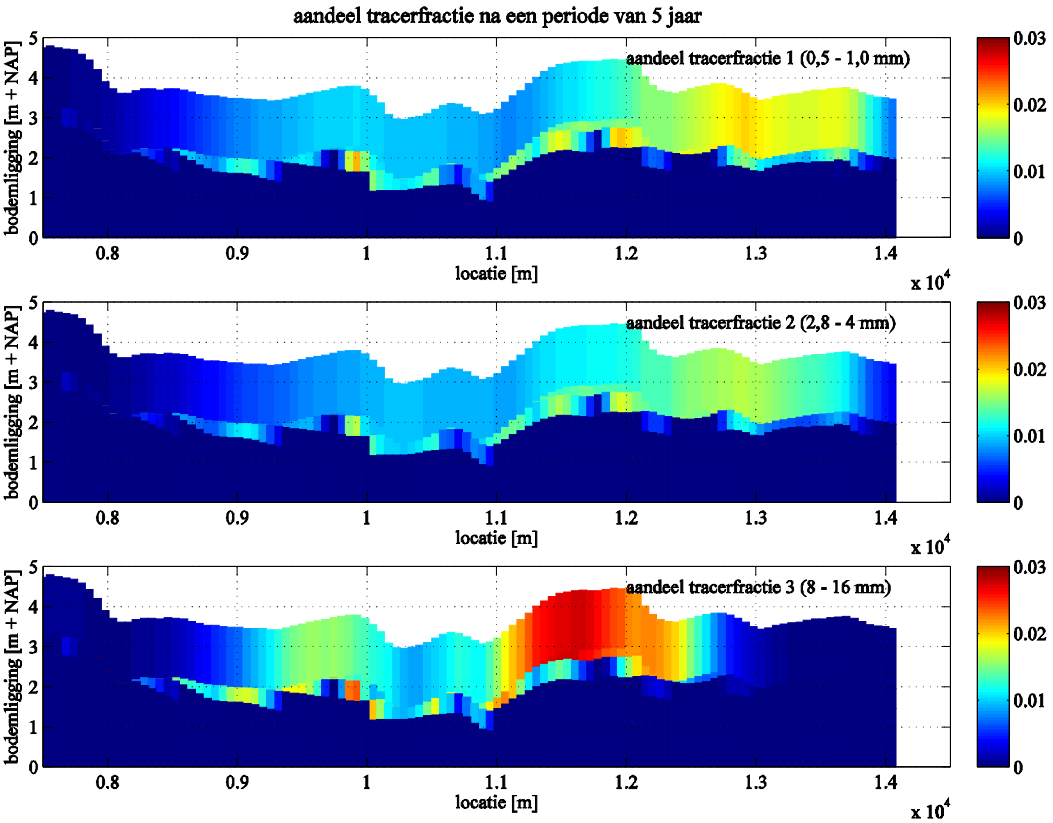
Zijaanzichten van het aandeel van de drie tracerfracties na 2,5 jaar, 5 jaar en 10 jaar zijn weergegeven in Figuur 5-11 tot en met Figuur 5-13. Deze figuren geven inzicht in de ruimtelijke verspreiding van het suppletiemateriaal. De fijnste fractie beweegt het snelst stroomafwaarts. De grofste fractie blijft het langst in het systeem aanwezig. Het verloop van het aandeel van de drie tracerfracties is ook grafisch uitgezet in Figuur 5-14. Figuur 5-15 en Figuur 5-16 geven bovenaanzichten van de ruimtelijke verdeling van de fijnste en de grofste tracerfracties van het suppletiemateriaal in de actieve toplaag aan het begin van de berekening en na periodes van 5 en 10 jaar. De suppleties blijven geconcentreerd in de buitenbochten waar ze zijn aangebracht.



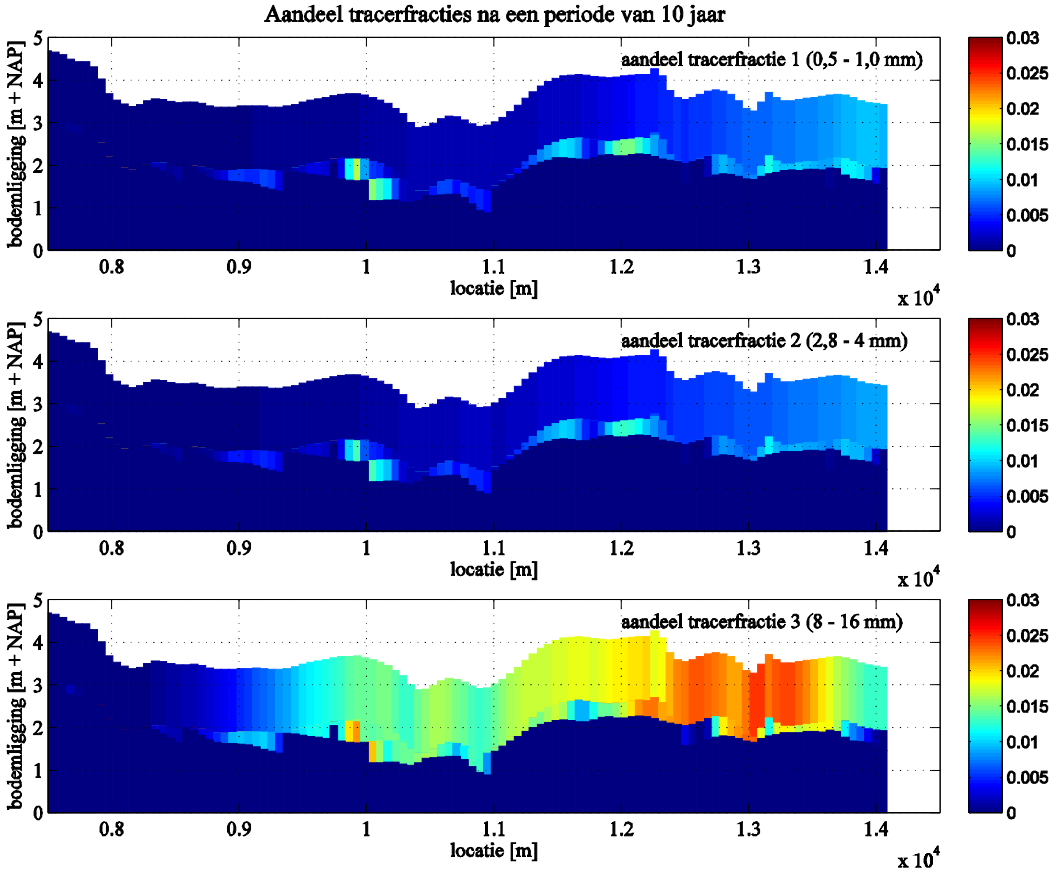
Figuur 5-10. Aandeel van drie tracerfracties aan het begin van de berekening.



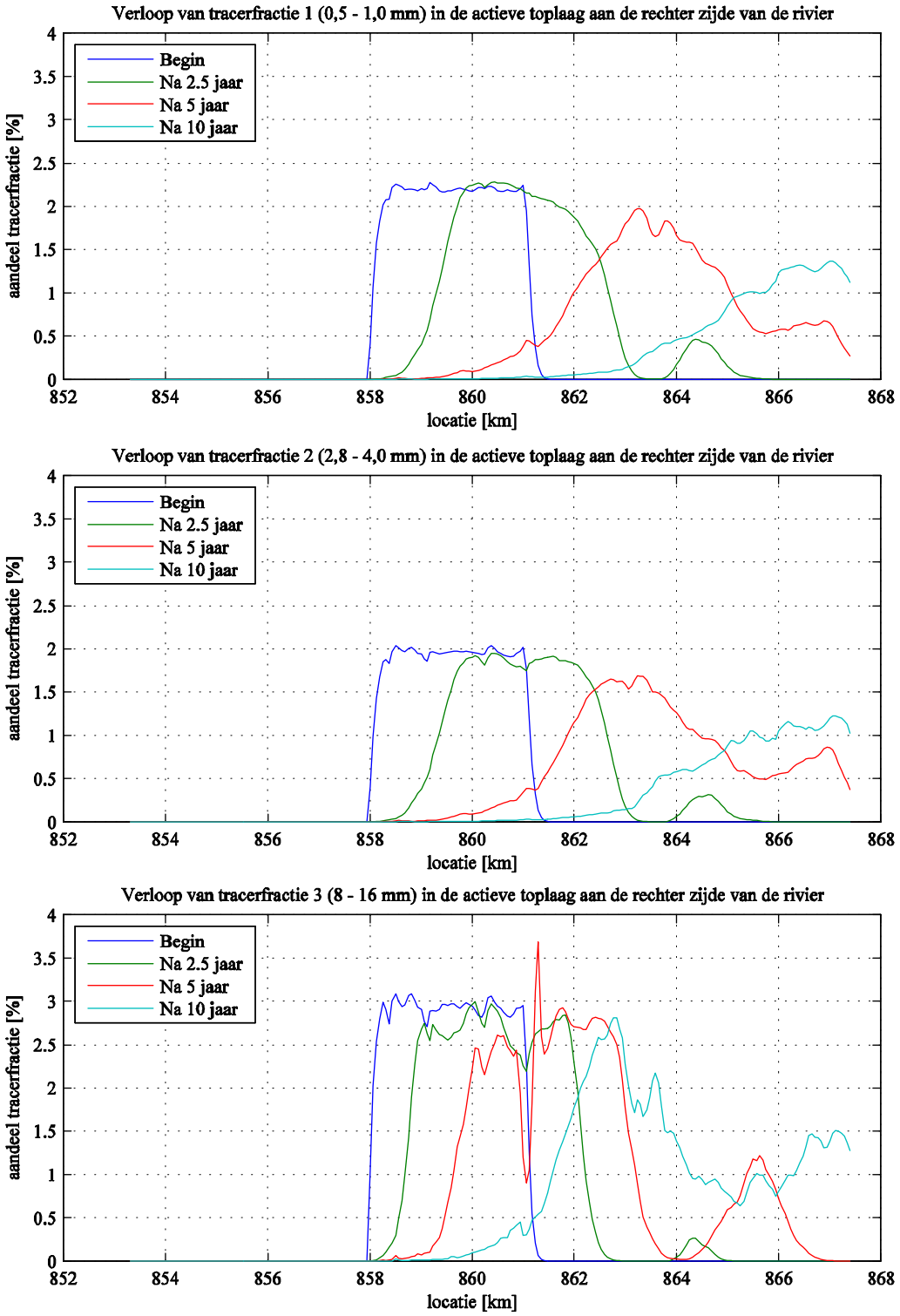
Figuur 5-11. Aandeel van drie tracerfracties na 2,5 jaar.



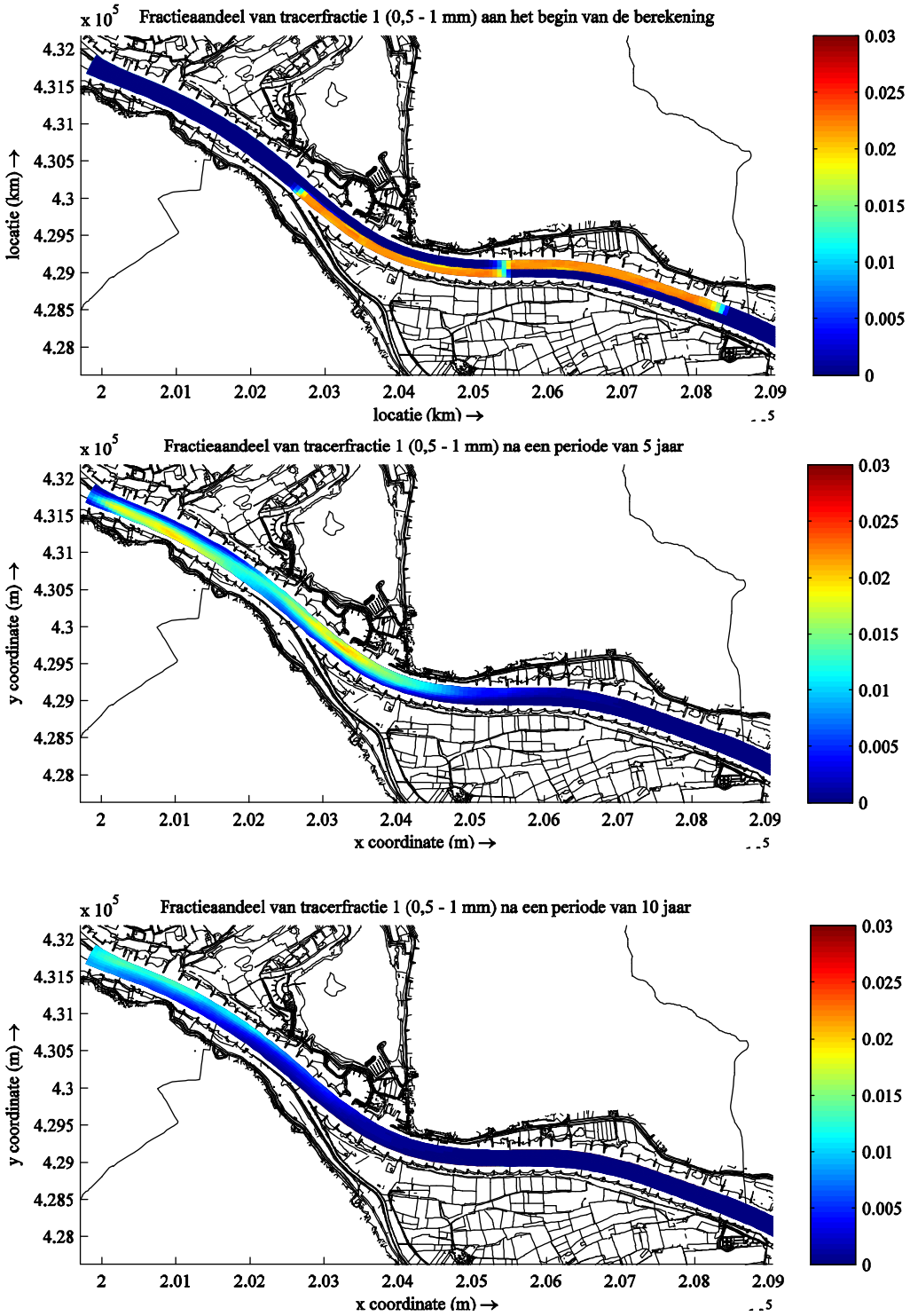
Figuur 5-12. Aandeel van drie tracerfracties na 5 jaar.



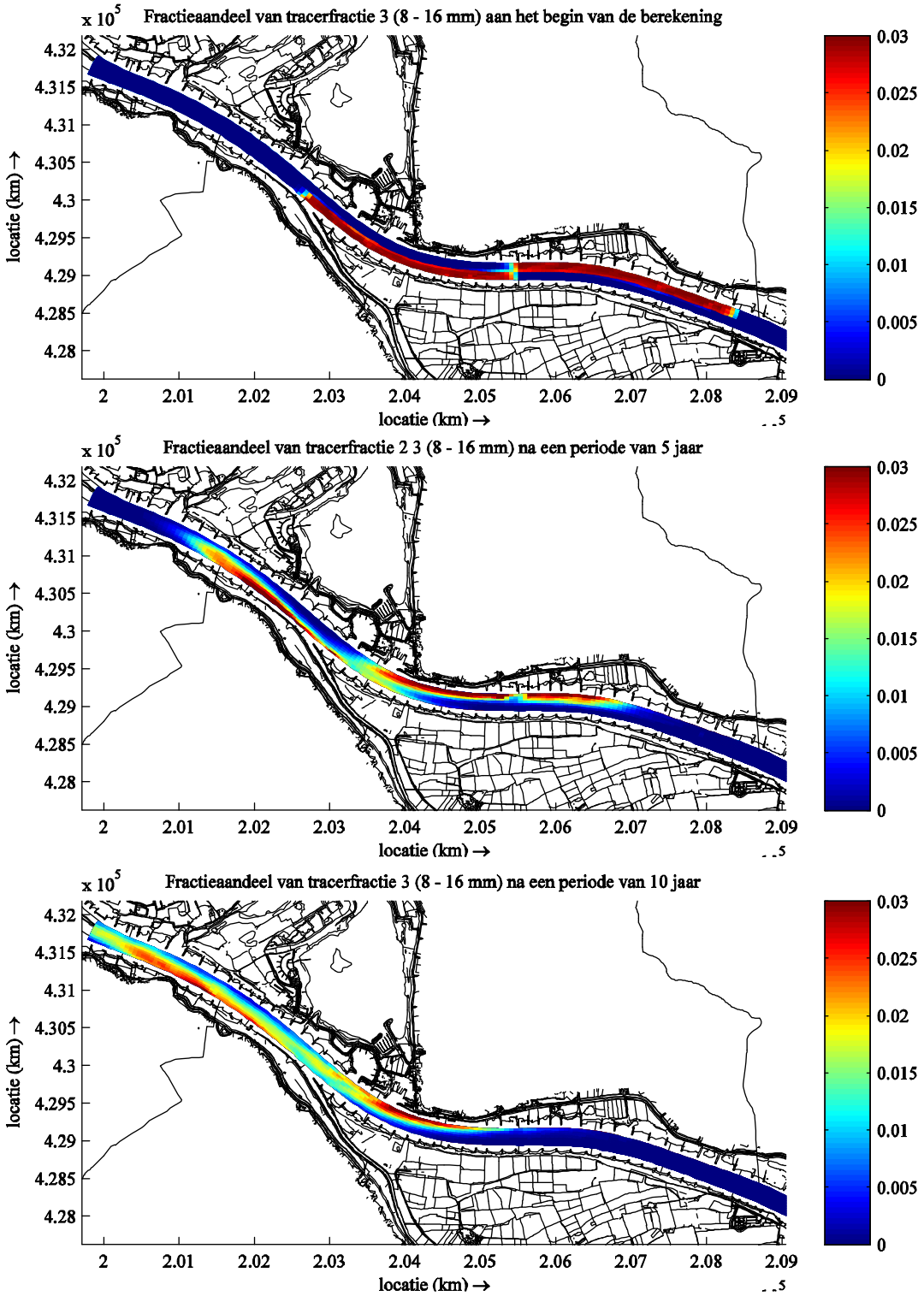
Figuur 5-13. Aandeel van drie tracerfracties na 10 jaar.



Figuur 5-14. Aandeel van drie tracerfracties direct na de suppletie en na periodes van 2,5 jaar, 5 jaar en 10 jaar aan de rechterzijde van de rivier.



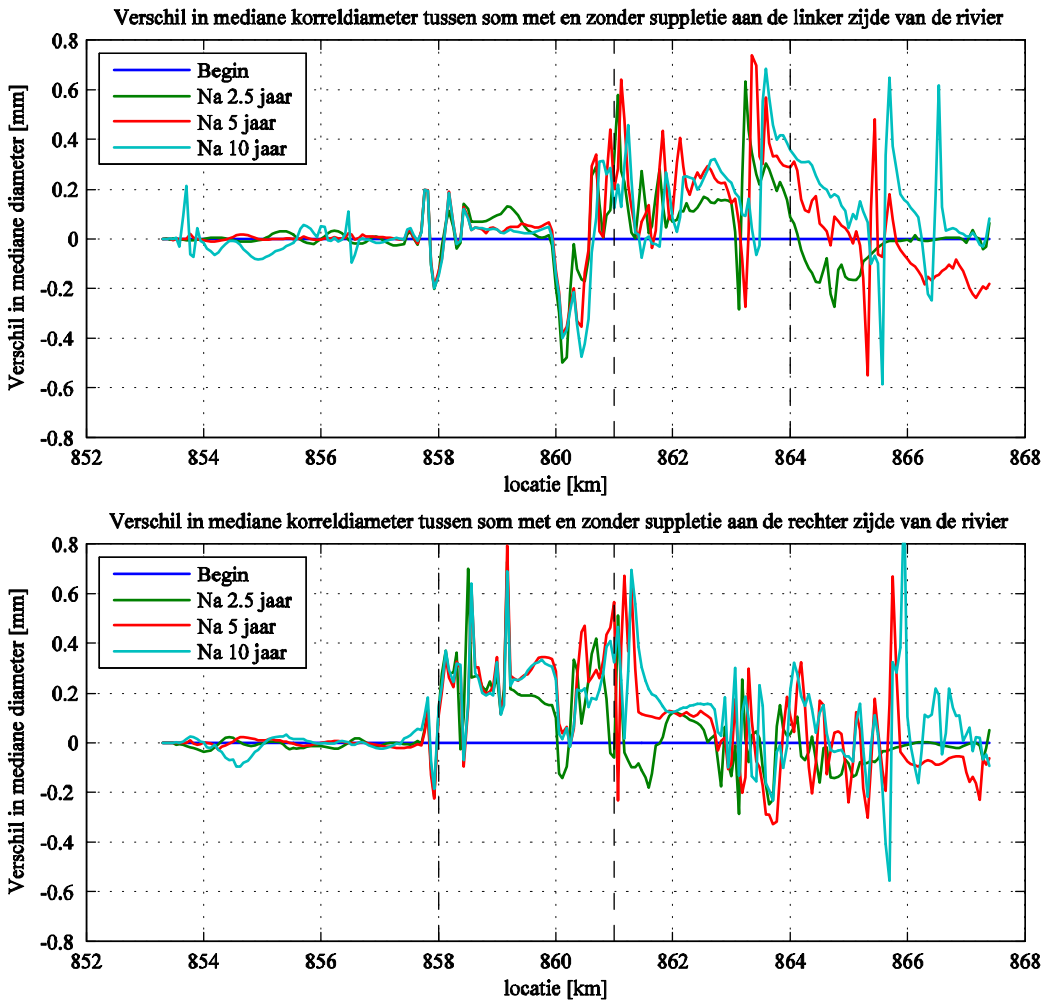
Figuur 5-15. Aandeel van de fijnste tracerfractie (0,5 – 1 mm) aan het begin van de berekening en na periodes van 5 jaar en 10 jaar.



Figuur 5-16. Aandeel van de grofste tracerfractie (8 – 16 mm) aan het begin van de berekening en na periodes van 5 jaar en 10 jaar.

5.3.2 Effect op samenstelling van bodemmateriaal

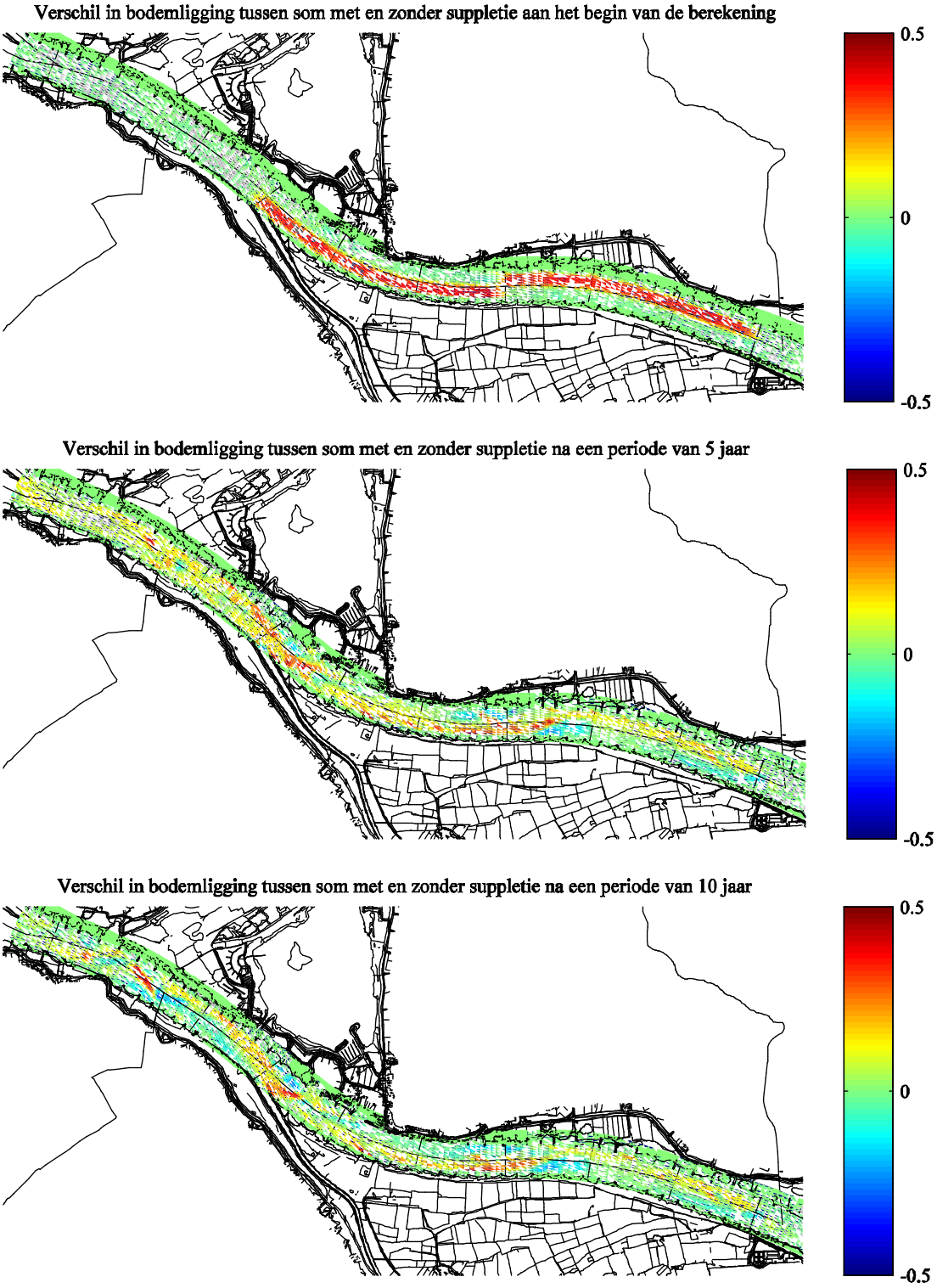
Figuur 5-17 toont voor Berekening 8 uit Tabel 5-1 het effect van de suppletie op de mediane korreldiameter, gemiddeld over het linker- en rechterdeel van de rivier. De tragere voortplanting van de grofste fractie leidt ertoe dat de mediane korreldiameter toeneemt op de trajecten waar gesuppleerd is. Deze trajecten zijn met zwarte stippellijnen in de figuren aangegeven.



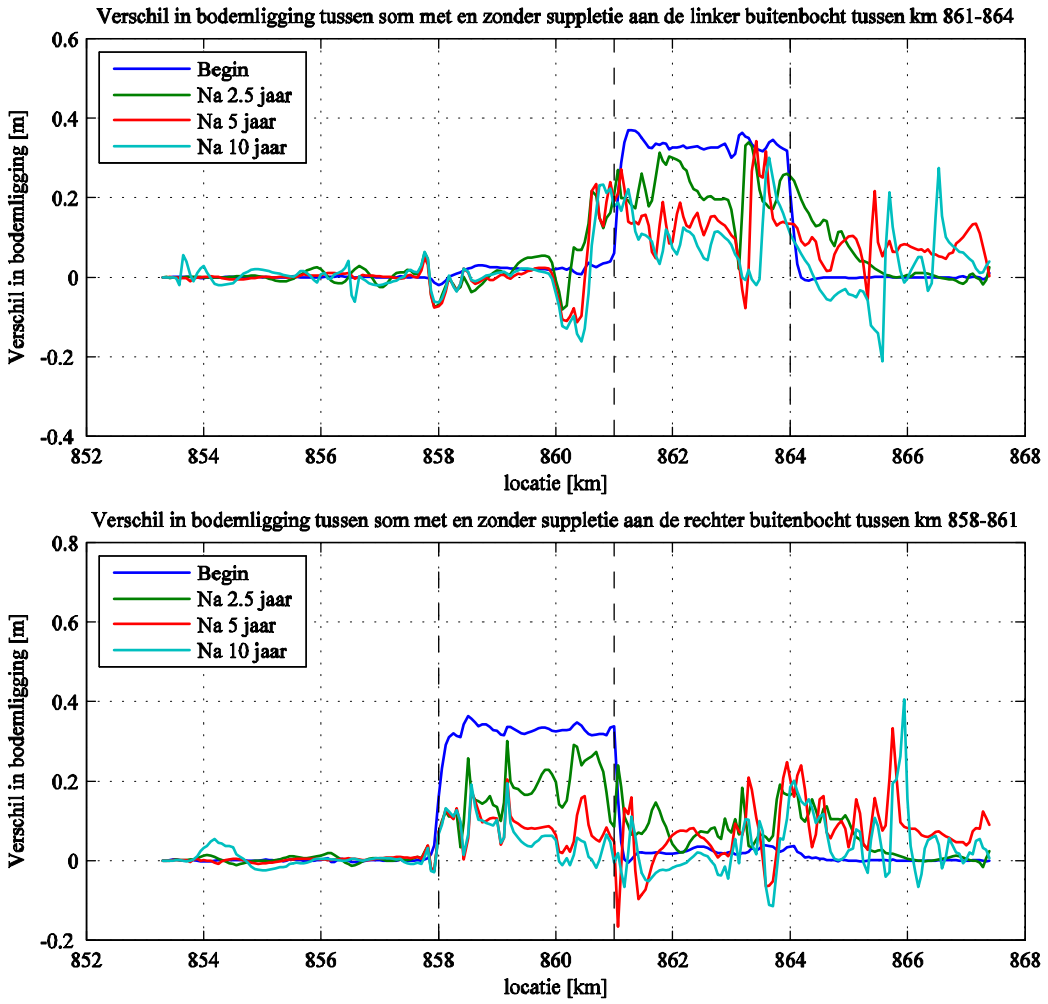
Figuur 5-17. Effect van suppletie op de mediane korreldiameter direct na de suppletie en na een periode van 10 jaar aan linker- en rechterzijde van de rivier.

5.3.3 Effect op bodemligging

Figuur 5-18 en Figuur 5-19 laten voor Berekening 8 uit Tabel 5-1 het effect op de bodemligging zien. Ook hieruit blijkt dat de suppletie zich geleidelijk stroomafwaarts verplaatst. Uitgaande van een 160 m breed en 3 km lang suppletietraject, komt een suppletievolume van 150.000 m^3 neer op een 0,3 m dikke laag sediment. Figuur 5-19 laat inderdaad zien dat de bodem direct na de suppletie ongeveer 0,3 m hoger ligt.



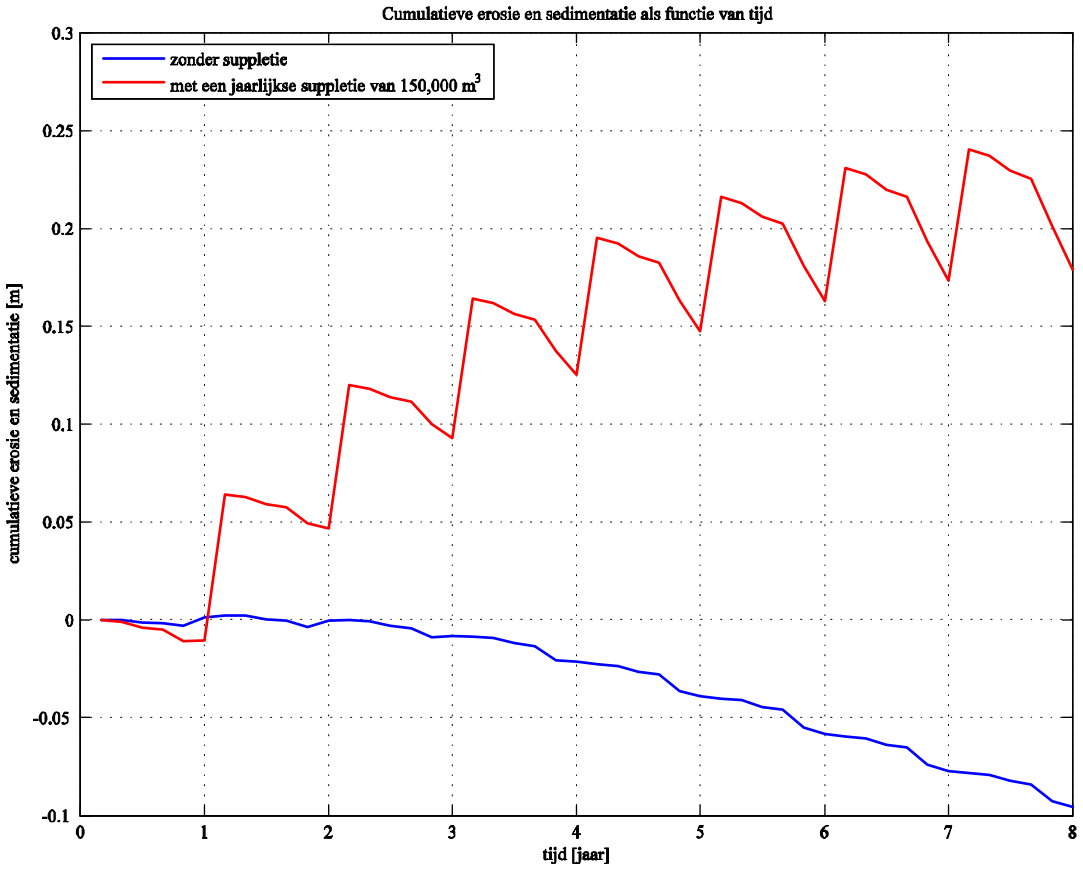
Figuur 5-18. Effect van suppletie op bodemligging direct na de suppletie en na periodes van 2,5 jaar, 5 jaar en 10 jaar.



Figuur 5-19. Effect van suppletie op bodemligging direct na de suppletie en na periodes van 2,5 jaar, 5 jaar en 10 jaar aan linker- en rechterzijde van de rivier.

5.3.4 Effectiviteit van een jaarlijkse suppletie op de bodemstabilisatie

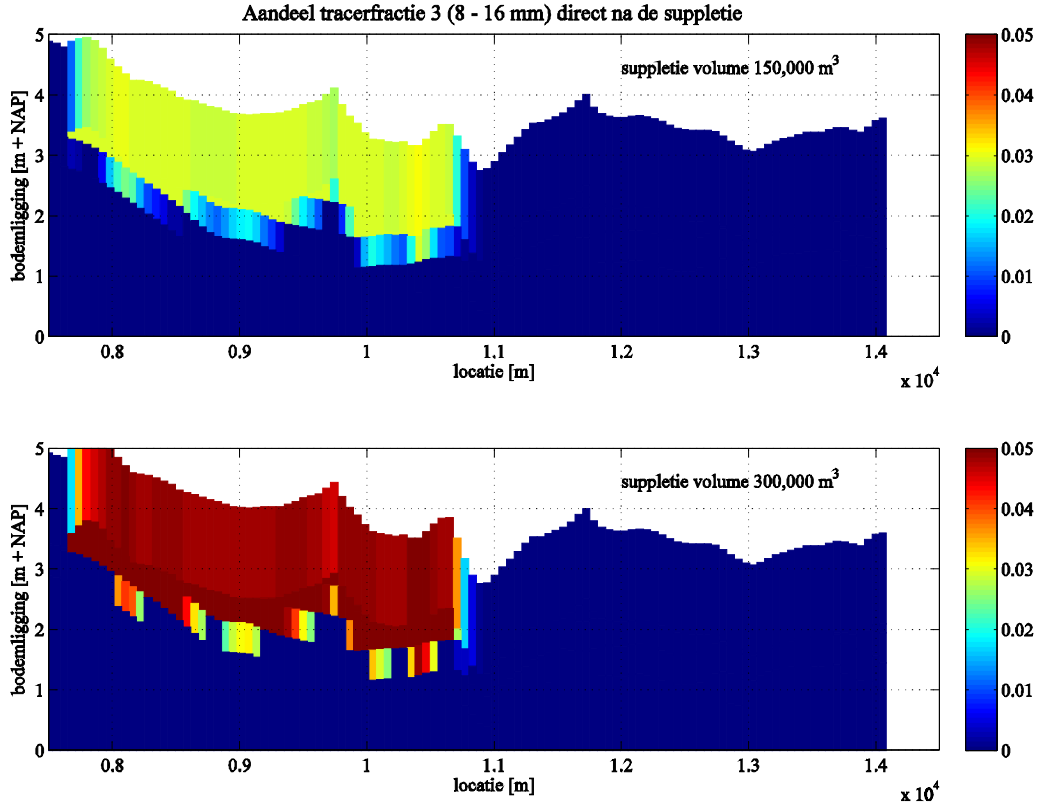
Het effect op de stabilisatie van de rivierbodem bij een jaarlijkse herhaling van de suppletie van 150.000 m^3 per bocht is onderzocht met Berekening 12 uit Tabel 5-1. Figuur 5-20 toont de over het gehele modelgebied gemiddelde cumulatieve erosie en sedimentatie als functie van tijd. De jaarlijkse suppletie blijkt een stabiliserende werking op de rivierbodem te hebben.



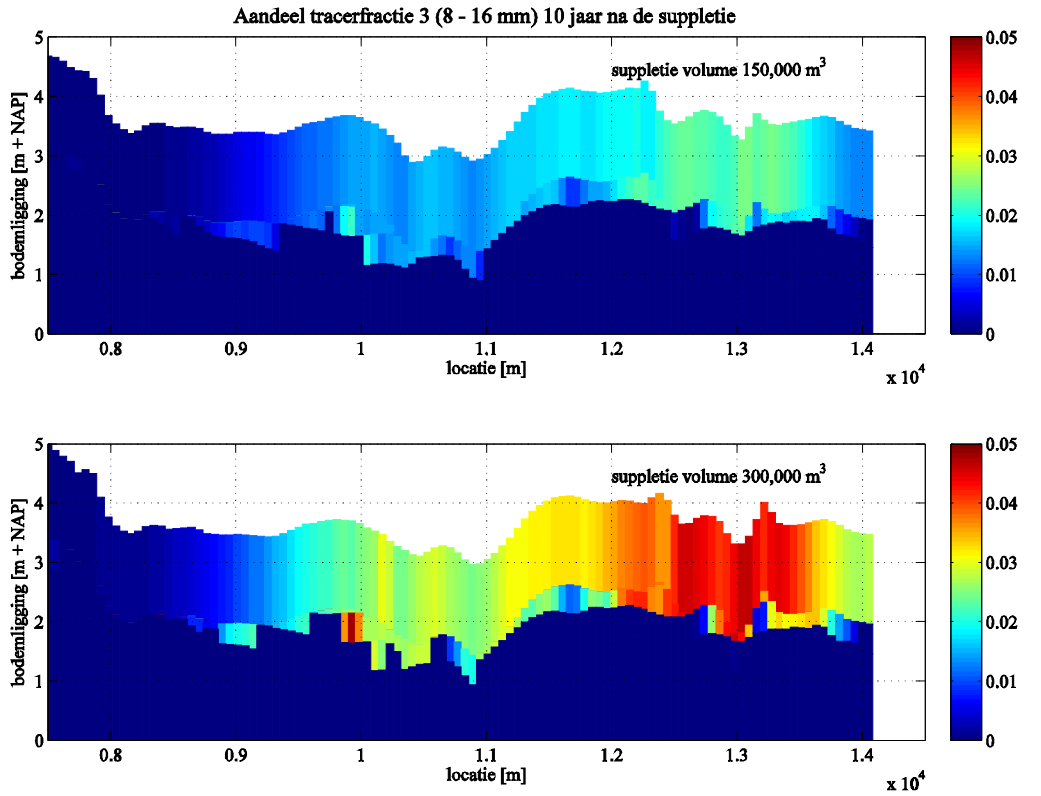
Figuur 5-20. Effect van suppletie op bodemligging direct na de suppletie en na periodes van 2,5 jaar, 5 jaar en 10 jaar aan linker- en rechterzijde van de rivier.

5.3.5 Gevoeligheid voor suppletievolume

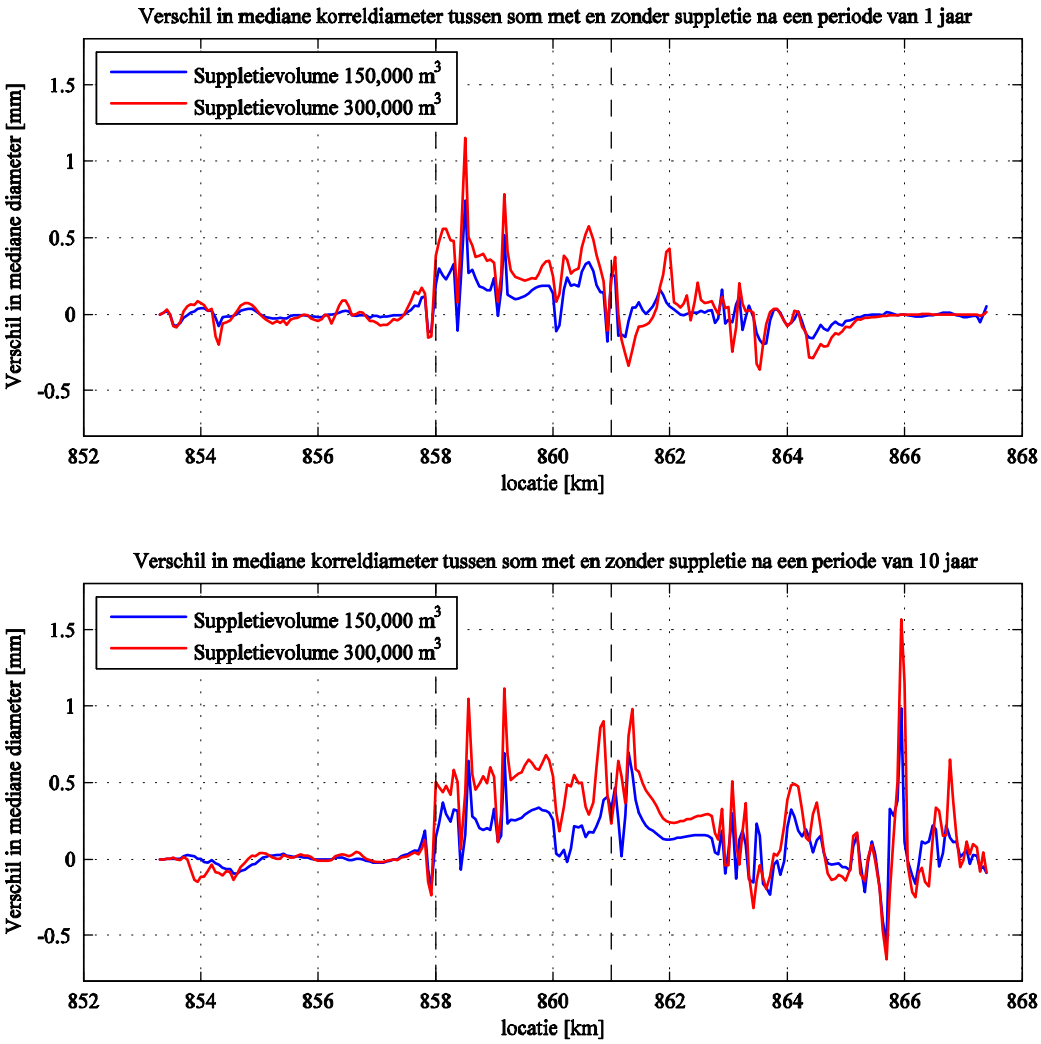
De invloed van het suppletievolume op de effectiviteit van de suppletie is onderzocht door verdubbeling van het suppletievolume in Berekening 9 van Tabel 5-1. De samenstelling van het suppletiemateriaal is gelijk aan die in Berekening 8. Figuur 5-21 en Figuur 5-22 laten zien dat het aandeel van de grofste tracerfractie in de actieve bodemlaag groter is. Bij een tweemaal zo groot suppletievolume is er na een periode van 10 jaar ook ongeveer tweemaal zoveel van het grofste suppletiemateriaal in het systeem aanwezig. Figuur 5-23 laat zien dat dit leidt tot een sterkere vergroving van de rivierbodem. Figuur 5-24 toont verder dat een verdubbeling van het suppletievolume ook na 10 jaar nog een verdubbeld effect op de bodemligging heeft.



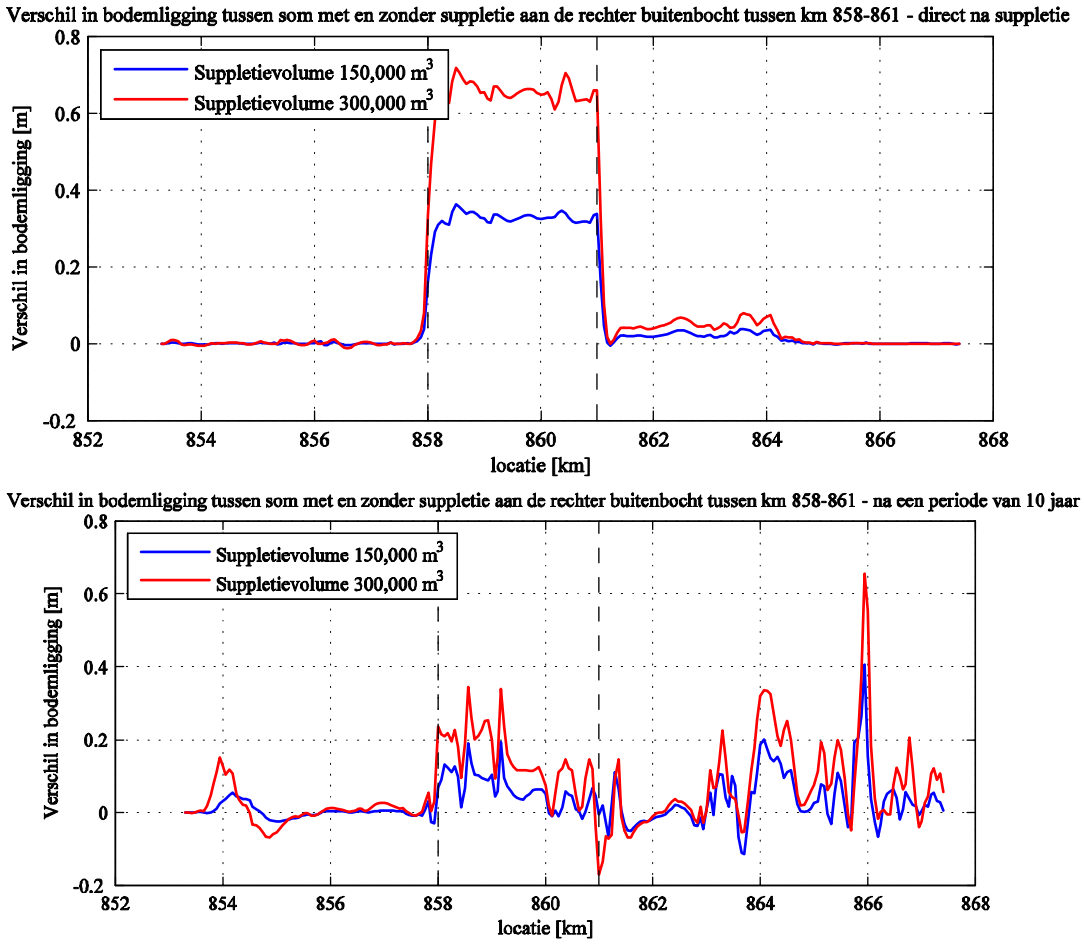
Figuur 5-21. Aandeel van grofste tracerfractie aan rechterzijde van de rivier direct na de suppleties van 150.000 en 300.000 m^3.



Figuur 5-22. Aandeel van grofste tracerfractie aan rechterzijde van de rivier 10 jaar na de suppleties van 150.000 en 300.000 m^3.



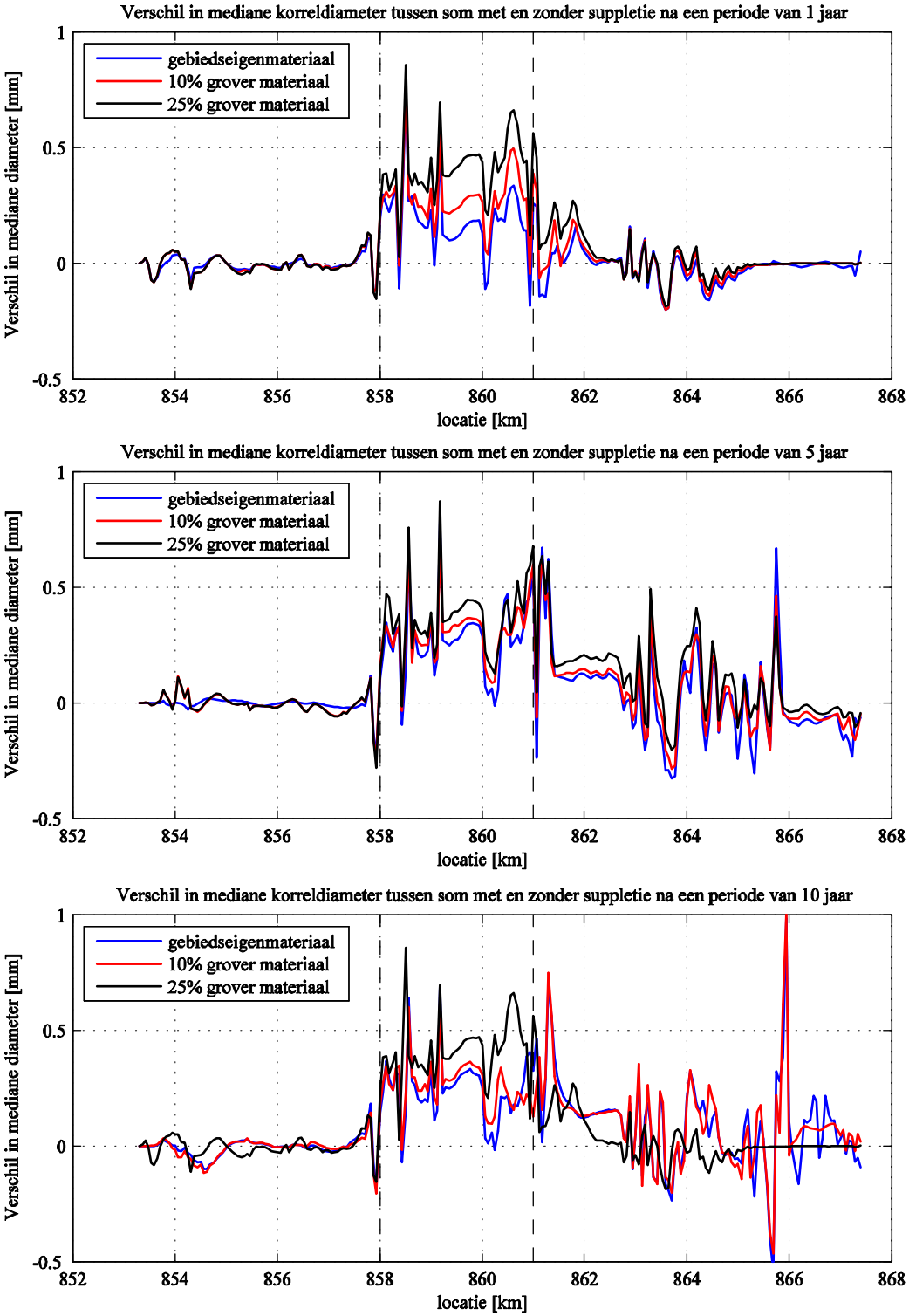
Figuur 5-23. Effect van suppletie op mediane korreldiameter aan rechterzijde van rivier direct na de suppleties van 150.000 en 300.000 m^3 en na een periode van 10 jaar.



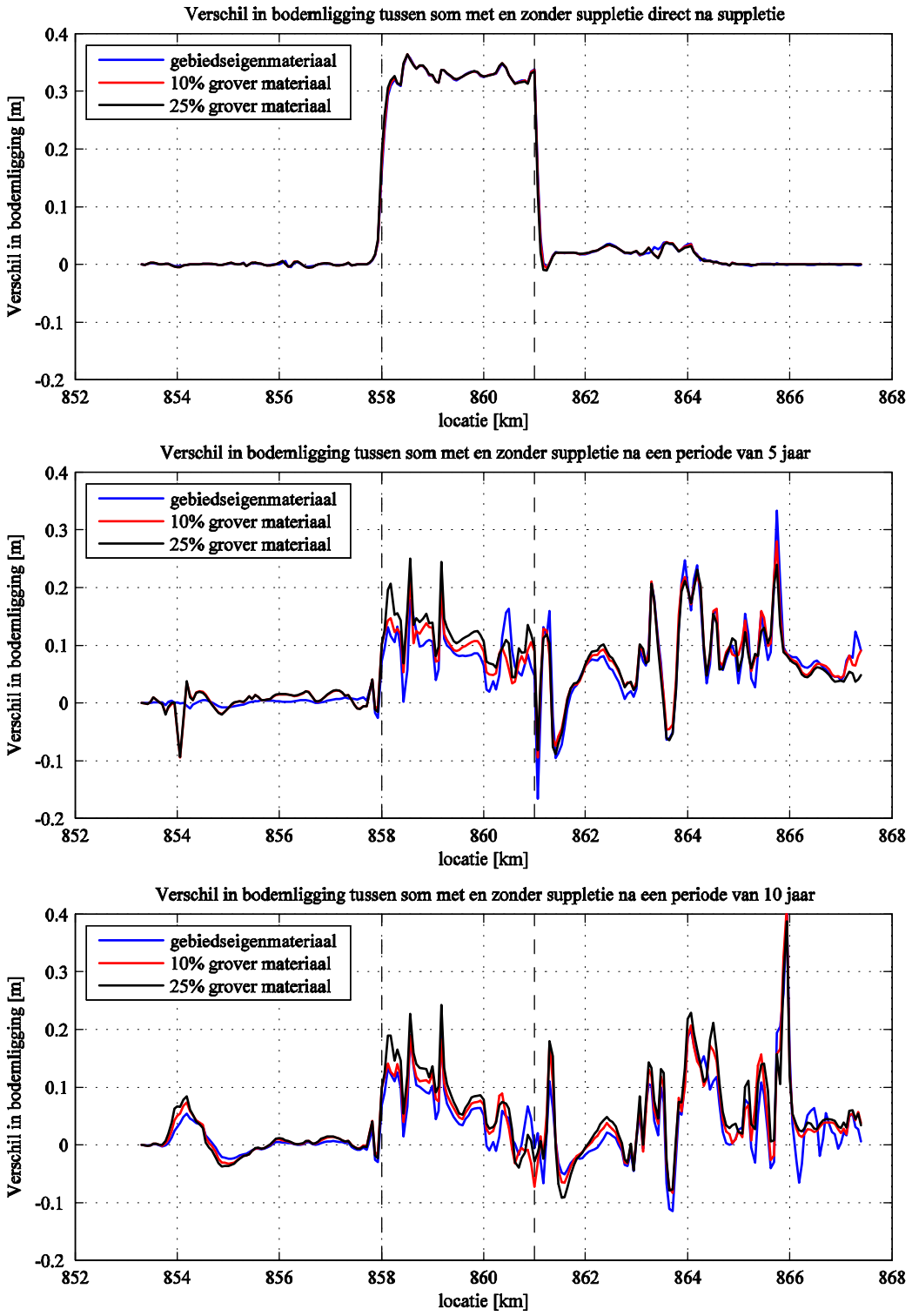
Figuur 5-24. Effect van suppletie op bodemligging aan rechterzijde van rivier direct na de suppleties van 150.000 en 300.000 m^3 en na een periode van 10 jaar.

5.3.6 Gevoeligheid voor samenstelling van het suppletiemateriaal

Het effect van de samenstelling van het suppletiemateriaal is onderzocht aan de hand van de Berekeningen 10 en 11 in Tabel 5-1. In Berekening 10 is de suppletie ongeveer 10% grover door verwijdering van de fijnste fractie, in Berekening 11 ongeveer 25% grover door verwijdering van de twee fijnste fracties. Figuur 5-25 en Figuur 5-26 geven de resultaten. Het grovere suppletiemateriaal leidt tot een vergroving van de gemiddelde bodemsamenstelling. Doordat het grovere materiaal zich minder snel verplaatst en langer in het systeem blijft, is de suppletie efficiënter. De aangebrachte 0,3 m dikke laag verdwijnt minder snel.



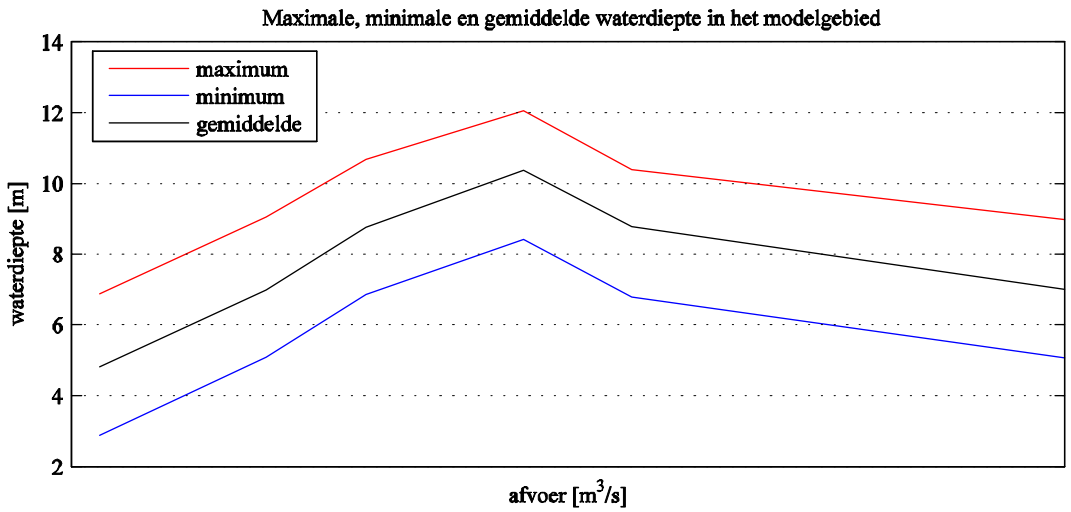
Figuur 5-25. Effect van suppletie op mediane korreldiameter aan rechterzijde van rivier op 0, 5 en 10 jaar na de suppleties van 150.000 m^3 aan gebiedseigen materiaal, 10% grover materiaal en 25% grover materiaal.



Figuur 5-26. Effect van suppletie op bodemligging aan rechterzijde van rivier op 0, 5 en 10 jaar na de suppleties van 150.000 m^3 aan gebiedseigen materiaal, 10% grover materiaal en 25% grover materiaal.

5.3.7 Gevoeligheid voor dikte van actieve laag

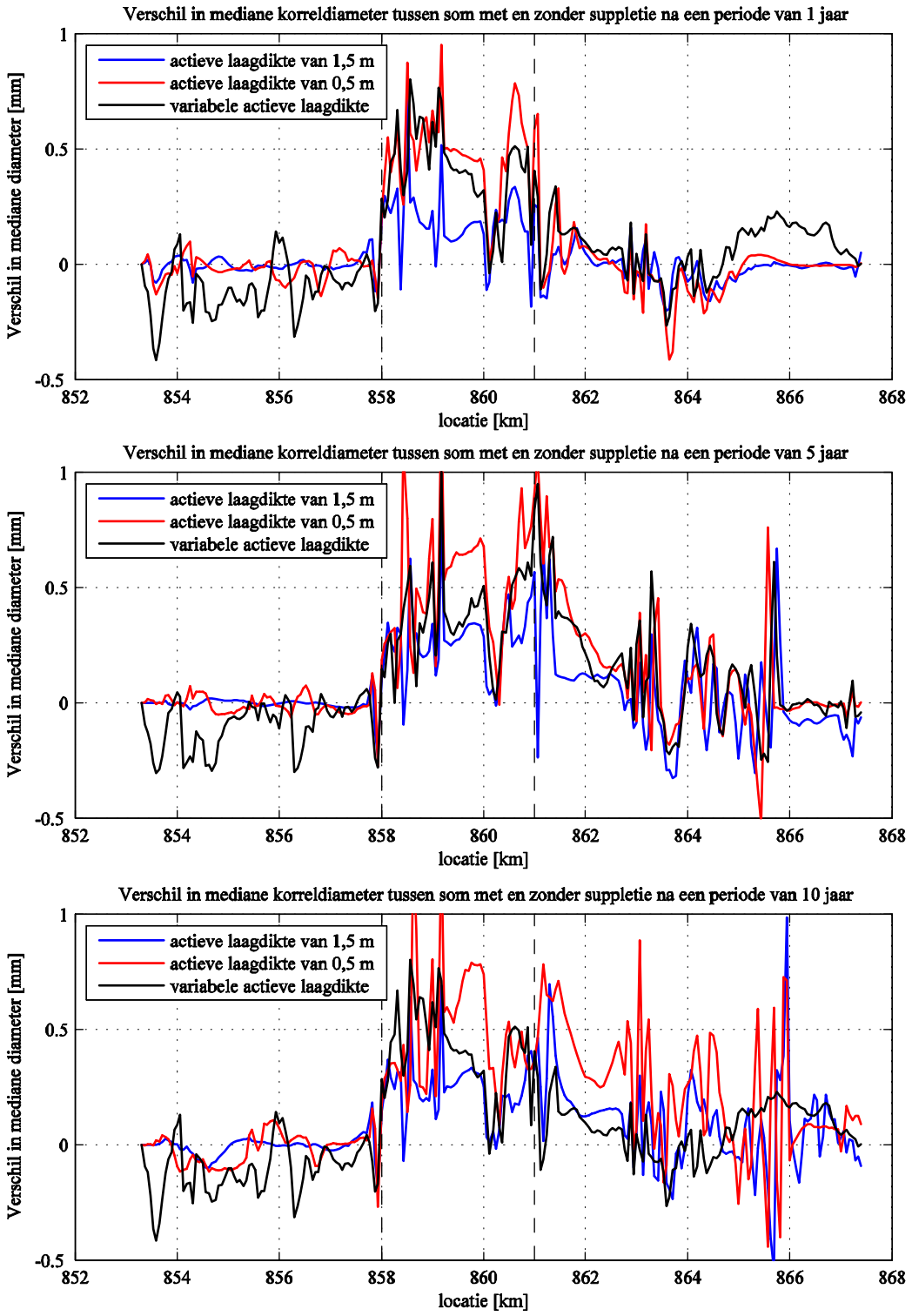
De gevoeligheid voor de dikte van de actieve laag is al geanalyseerd in Paragraaf 5.2.1. De Berekeningen 13 en 14 uit Tabel 5-1 betreffen in feite een uitbreiding van de analyse naar een variabele afvoer. De actieve-laagdikte bedraagt 0,5 m in Berekening 13 en 10% van de waterdiepte in Berekening 14. Figuur 5-28 geeft een indicatie van de grootste, kleinste en gemiddelde waterdiepten in het modelgebied bij verschillende afvoerniveaus. De bijbehorende variabele laagdikte varieert ongeveer tussen 0,3 m en 1,2 m.



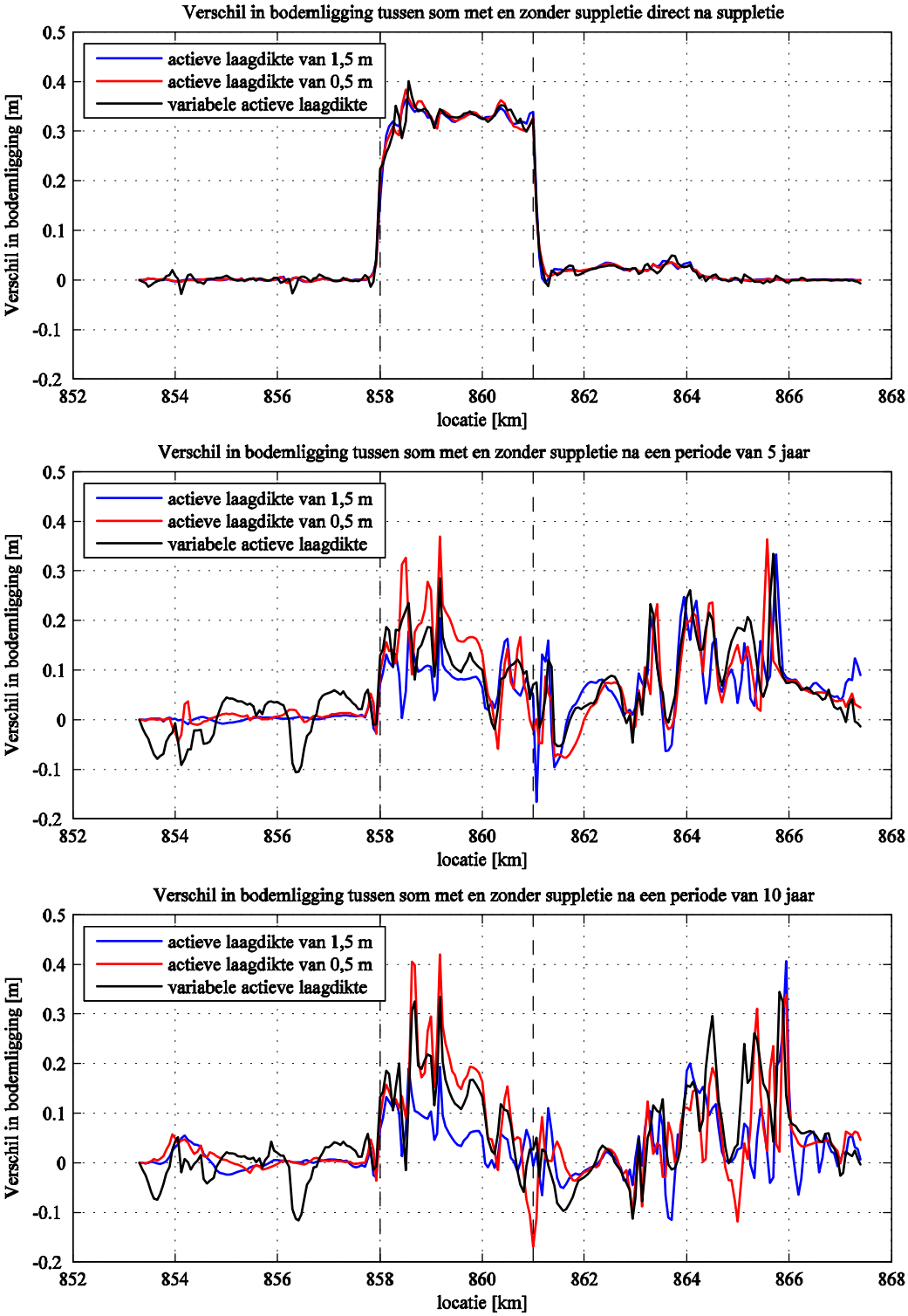
Figuur 5-27. Maximale, minimale en gemiddelde waterdiepte in het modelgebied bij verschillende afvoerniveaus.

De resultaten in Figuur 5-28 en Figuur 5-29 laten een zelfde beeld zien als de resultaten in Paragraaf 5.2.1. Bij een kleinere laagdikte blijft, als gevolg van een snellere vergroving en een sterkere afpleistering van de bodem, een groter deel van het gesuppleerde materiaal in de suppletietrajecten achter. De bodem komt initieel met ongeveer 0,3 m omhoog, maar erodeert daarna voor de berekeningen met een kleinere laagdikte veel minder.

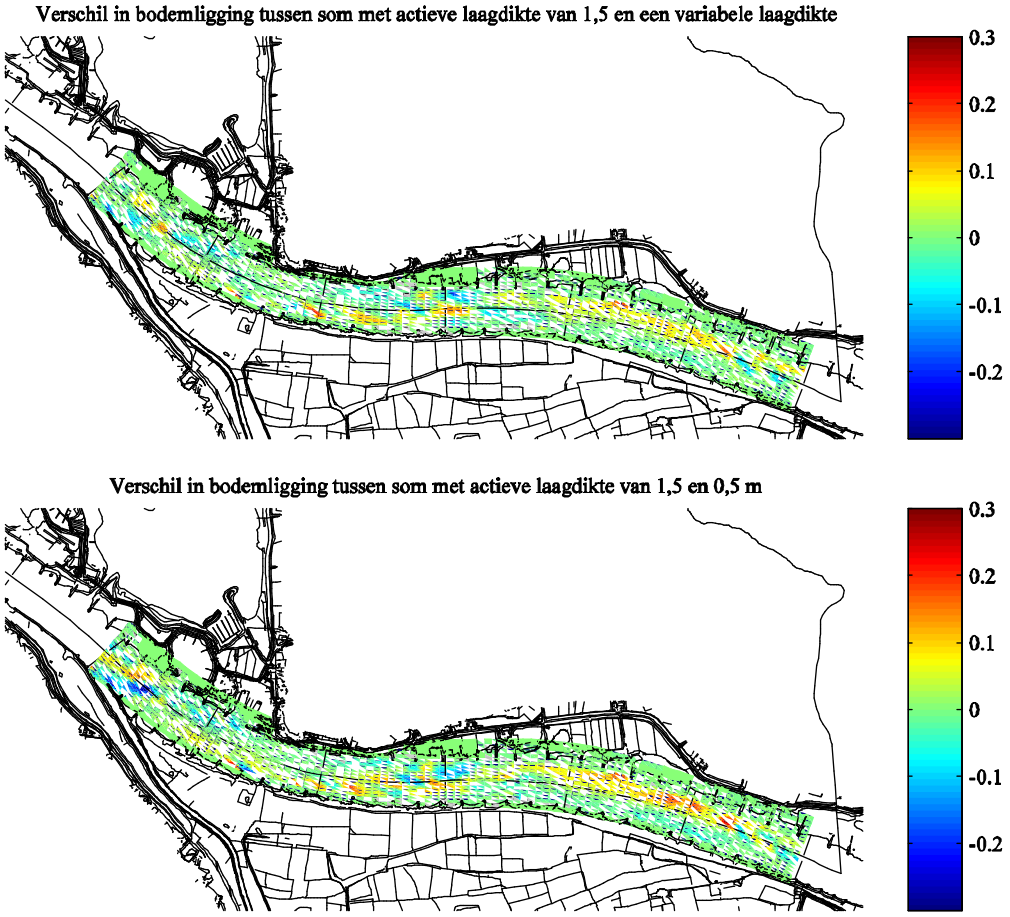
Figuur 5-30 geeft de verschillen in bodemligging weer tussen de suppletieberekening met een laagdikte van 1,5 m en de suppletieberekeningen met een laagdikte van 0,5 m en een variabele laagdikte. Ook hieruit valt af te lezen dat er meer van het gesuppleerde materiaal in de suppletietrajecten achterblijft naarmate de actieve laag dunner is.



Figuur 5-28. Effect van suppletie op mediane korreldiameter aan rechterzijde van rivier op 0, 5 en 10 jaar na de suppleties, bij actieve-laagdiktes van 0,5 m, 1,5 m en 10% van de waterdiepte.



Figuur 5-29. Effect van suppletie op bodemligging aan rechterzijde van rivier op 0, 5 en 10 jaar na de suppleties, bij actieve-laagdiktes van 0,5 m, 1,5 m en 10% van de waterdiepte.



Figuur 5-30. Verschil in bodemligging na 10 jaar tussen de berekening met een actieve-laagdikte van 1,5 m en de berekeningen met actieve-laagdiktes van 0,5 m en 10% van de waterdiepte.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De drie casestudies hebben inzicht geleverd in enerzijds de effectiviteit van bepaalde maatregelen in de vaarweg en anderzijds de mogelijkheden van het nieuwe morfologische model.

Casestudy A betreft een grootschalige maatregel tussen km 868 en 920, die bestaat uit de aanleg van langsdammen die de rivier bij lage afvoeren versmalt, en kribverlaging die de rivier bij hoge afvoeren verruimt. Gevonden wordt dat deze maatregel een aantal knelpunten voor de scheepvaart oplost. Op het knelpunt km 883-884 in de bocht bij Nijmegen blijkt de aanleg van langsdammen echter juist de bevaarbaarheid te verslechteren. Mogelijk is dit te wijten aan de bevinding van Sloff et al (2006) dat vaste lagen leiden tot *aanzanding* van de binnenbocht als bochten smal zijn. Gevonden is verder dat de afvoeronttrekkingen aan het begin van de langsdammen knelpunten veroorzaken. Tijdens hogere afvoeren worden hier sedimentatiegolven opgewekt die zich tijdens lagere afvoeren stroomafwaarts verplaatsen en gedeeltelijk weer uitdempen. Dit behoeft aandacht in toekomstige berekeningen ten behoeve van de optimalisatie van het ontwerp.

Casestudy B betreft een verandering in beheer die nodig is als de vaarweg wordt verruimd van 150 m × 2,5 m naar 170 m × 2,8 m. De ten behoeve van deze casestudy verbeterde functionaliteit voor baggeren en storten blijkt in principe een sterk en flexibel hulpmiddel te zijn voor het evalueren van verschillende baggerstrategieën. De betrouwbaarheid van de resultaten is echter vooralsnog gering. De meeste baggerwerkzaamheden blijken in de simulaties op te treden in het meest bovenstroomse traject. Veldgegevens uit de periode 1990-1996 leren echter dat op de Waal vooral meer stroomafwaarts, tussen km 915 en km 951, is gebaggerd. Dit wordt niet door het model gereproduceerd. Mogelijk is dit te verklaren doordat geen gebruik gemaakt is van de duinhoogtevoorspeller en de functionaliteit om bij het baggeren met duinen rekening te houden. Het kan echter ook zijn dat de toegepaste schematisatie herzien moet worden. Verder geldt eigenlijk voor de berekende OLR dat deze te hoog is en bovendien aanzienlijk verandert gedurende de simulatie van 5 jaar. Ook dit behoeft aandacht in toekomstige berekeningen.

Casestudy C betreft suppletie van sediment in erosiegebieden om voortgaande daling van de rivierbodem een halt toe te roepen. De simulaties laten zien dat de grove fracties van het gesuppleerde materiaal zich langzamer stroomafwaarts verplaatsen dan de fijne fracties en daardoor ook langer in het systeem aanwezig blijven. Na een periode van 10 jaar is het fijne suppletiemateriaal tot 4 mm bijna geheel uit het systeem verdwenen. Door dit verschil in voortplantingssnelheden wordt het bodemmateriaal grover in de actieve laag van de trajecten waar gesuppleerd is. Het in de buitenbochten aangebrachte suppletiemateriaal blijft redelijk geconcentreerd in die buitenbochten en verspreidt zich niet over het hele dwarsprofiel.

Een verdubbeling van het suppletievolume sorteert ook min of meer een verdubbeld effect. Suppletie met grover materiaal blijkt efficiënter dan suppletie met materiaal dat dezelfde eigenschappen heeft als het al ter plaatse aanwezige sediment.

De invloeden van de actieve-laagdikte en het aantal korrelfracties op de resultaten zijn uitvoerig geanalyseerd. Een dunnere actieve laag leidt tot snellere vergroving en afpleistering. Toevoeging van twee grovere sedimentfracties verkleint het transport maar heeft opvallend genoeg nauwelijks effect op de voortplantingssnelheden van bulten sediment. Dit is te verklaren aan de hand van een karakteristiekenanalyse voor de interacties tussen bodemligging en bodemsamenstelling. Het effect van het geringere transport blijkt gecompenseerd te worden door het effect van een groter verschil tussen de gemiddelde korrelgroottes van materiaal in transport en materiaal op de bodem.

6.2 Aanbevelingen

Voor toekomstige berekeningen met langsdammen wordt aanbevolen om de ongunstige lokale aanzandingen aan het begin van de langsdammen te minimaliseren door (1) instroming en uitstroming over een iets langer traject geleidelijk te laten plaatsvinden, (2) het moment van meestromen beter te kiezen, of (3) de ligging van de uiteinden van de langsdammen beter te kiezen.

Aanbevolen wordt om de resultaten van de huidige functionaliteit voor baggeren en storten vooralsnog alleen te gebruiken in relatieve, vergelijkende zin, omdat de betrouwbaarheid van de resultaten nu nog gering is.

Aanbevolen wordt om de ontwikkeling van het instrument voort te zetten aan de hand van de volgende lijst, die in overleg met de opdrachtgever is opgesteld:

1. Deel 1 – Reductie van rekentijden door onderzoek naar
   a) toepassing van parallel rekenen
   b) verdere optimalisatie van het rekenrooster
   c) efficiënter beschrijving van uiterwaardstroming
   d) optimalisatie van het geschematiseerde afvoerverloop met behulp van een morfologische factor
   e) reductie van fysische processen in deeldomeinen

2. Deel 2 – Verbetering van het huidige model via
   a) implementatie en verbetering van een duinhoogtevoorspeller
   b) uitgebreider kalibratie en verificatie van berekende vaardiepte en beheer
   c) verbetering van de transportformulering door implementatie van
      i) een combinatieformule met overgang tussen bestaande formules
      ii) een afzonderlijke transportformule per korrelgroottefractie
      iii) een correctie van het sedimenttransport over een stabiele ondergrond
      iv) een variabele bodemruwheid
   d) implementatie van een variabele laagdikte voor het transport van gegradeerd sediment

3. Deel 3 – Pilot-toepassing van het model op maatregelen, gericht op

a) de invloed van suppletie en vaste laag in de Bovenrijn op bevaarbaarheid en bodemdaling
b) het ontwerp van semi-stabiele lagen in de buitenbochten van Haalderen en Hulhuizen en in een opgevulde ontgrondingskuil van de vaste lagen
c) de optimalisatie van het beheer van een vaargeul van 150 m × 2,8 m
d) de invloed van DVR-maatregelen op afvoerverdeling en bevaarbaarheid
e) de optimalisatie van langsdammen in de Waal
f) de optimalisatie van in het kader van Ruimte voor de Rivier (RvR) uitgevoerde kribverlaging ten behoeve van beheer en onderhoud
g) de invloed van een geïntegreerd DVR-RvR-maatregelpakket op hoogwaterstanden en bevaarbaarheid
h) een casestudy van suppletie op de Niederrhein

7 Literatuurverwijzingen

Ashida, K & M. Michiue (1972), Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams. Transactions Japanese Society of Civil Engineers, 206, pp.59-69.

Barneveld, H.J. & K. Vermeer (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Calibratie en verificatie. Rapport PR956.10, HKV Lijn in Water.

Baur, T., H. Havinga & D. Abel (2002), Internationale Zusammenarbeit bei der Planung von Regulierungsmaßnamen am Niederrhein: Durchführung flussmorphologischer Simulationen. HANSA International Maritime Journal, 10/2002, pp.51-56.

Baur, T. & H.R.A. Jagers (2002), Grensproject Bovenrijn / Grenzprojekt Niederrhein; Model construction, calibration and verification. Rapport Q2496.00, WL | Delft Hydraulics.

Beersma, J.J., T.A. Buishand & H. Buiteveld (2004), Droog, droger, droogst; KNMI/RIZA-bijdrage aan de tweede fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie 199-II, De Bilt, 2004, ISBN 90-369-2260-7.

Brinke, W.B.M. ten & E. Gölz (2001), Bed level changes and sediment budget of the Rhine near the German – Dutch border. Rijkswaterstaat RIZA, rapport 2001.044, ISBN 9036954002.

Hirano, M. (1972), Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of non-uniform material. Transactions Japanese Society of Civil Engineers, Vol.4.

Meyer-Peter, E. & R. Müller (1948), Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd Congress IAHR, Stockholm, Paper No.2, pp.39-64.

Mosselman, E., C.J. Sloff & H.R.A. Jagers (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Voorbereiding. Rapport Q3963.00, WL | Delft Hydraulics.

Ottevanger, W. & M. Yossef (2006), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Roosteruitbreiding met Beneden Merwede en Nieuwe Merwede. Rapport Q4186.00, WL | Delft Hydraulics.

Ribberink, J.S. (1987), Mathematical modelling of one-dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. PhD thesis, Delft University of Technology, Communications on Hydr. and Geotech. Engrg., No.87-2, Delft Univ. of Technol., ISSN 0169-6548.

Rijkswaterstaat (1993), Toekomstvisie Waal Hoofdtransportas. Nota III, Eindrapportage, Rijkswaterstaat Directie Gelderland, Projectbureau Waal.

Sieben, A. (2005), Morfologische effecten van herinrichting; PKB Ruimte voor de Rivier. Werkdocument 2005.044x, Rijkswaterstaat RIZA.

Sieben, J., M.H.I. Schropp & E.H. van Velzen (2005), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Functioneel ontwerp. Werkdocument 2005.085x, Rijkswaterstaat RIZA.

Sieben, J. (2006), Baggeren en storten en het 2D morfologiemodel van DVR. WRR memo 2006-010, Rijkswaterstaat RIZA, Afdeling Rivieren, Arnhem, 7 april 2006.

Sloff, C.J. (1998), Toepassing van SOBEK-GEGRADEERD op de Rijntakken. Rapport Q2772, WL | Delft Hydraulics.

Sloff, C.J. (2006), Uitbreiding SOBEK-RT model naar niet-uniform sediment. Rapport Q4130.10, WL | Delft Hydraulics.

Sloff, C.J., E. Mosselman & J. Sieben (2006), Effective use of non-erodible layers for improving navigability. Proc. River Flow 2006, Lisbon, 6-8 Sept., 2006, Eds. R.M.L. Ferreira, E.C.T.L. Alves, J.G.A.B. Leal & A.H. Cardoso, Publ. Taylor & Francis, London, ISBN 978-0-415-40815-8, Vol.2, pp.1211-1220.

Smedes, R.H. (2005), Toekomstige Waal; Duurzame vaardiepte Rijndelta. Projectplan, Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland.

Vuren, S. van & C.J. Sloff (2006), Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach. Rapport Q4130, WL | Delft Hydraulics.

Vuren, S. van, E. Mosselman, K. Sloff & B. Vermeulen (2006), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Initiële modelbouw en demonstratieberekeningen. Rapport Q4082.00, WL | Delft Hydraulics.

Vuren, S. van & W. Ottevanger (2006), Inbouw duinhoogte- en ruwheidsvoorspellers in Delft3D-3DMOR. Rapport Q4190, WL | Delft Hydraulics.

Werf, J.J. van der (2001), Graded sediment at river bifurcations; An analytical and numerical study of the Rhine bifurcations. Afstudeerrapport 2001.147x, Universiteit Twente.

Yossef, M.F.M. (2005), Analyse bodemligging zomerbed bij Heesseltsche uiterwaarden. Memo ZWS/Q4039.10/8052040/MY d.d. 2 december 2005, WL | Delft Hydraulics.

Yossef, M., E. Mosselman, B. Jagers, K. Sloff, S. van Vuren & B. Vermeulen (2006), Voorspelinstrument duurzame vaarweg; Innovatieve aspecten. Rapport Q4082.00, WL | Delft Hydraulics.

A Karakteristiekenanalyse

De voortplantingssnelheden van kleine verstoringen in het morfologische systeem kunnen geschat worden met behulp van een karakteristiekenanalyse die aansluit op een eerdere analyse door Ribberink (1987). Hiervoor wordt uitgegaan van een eendimensionaal stelsel vergelijkingen voor waterbeweging en morfologie met gegradeerd sediment.

De eendimensionale quasi-stationaire waterbewegingsvergelijkingen luiden

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+g\frac{\partial z_{\mathrm{b}}}{\partial x}+g\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gu|u|}{C^2h}=0 \tag{A-1}$$

$$h\frac{\partial u}{\partial x}+u\frac{\partial h}{\partial x}=0 \tag{A-2}$$

waarin:

C	=	Chézy-coëfficiënt voor hydraulische ruwheid ($m^{1/2}/s$)
g	=	versnelling ten gevolge van de zwaartekracht (m/s^2)
h	=	waterdiepte (m)
u	=	over breedte en diepte gemiddelde stroomsnelheid (m/s)
x	=	coördinaat langs rivier (m)
z_b	=	bodemligging (m + NAP)

Voor de voortplanting van verstoringen over korte afstanden kan de wrijvingsterm in Vergelijking (A-1) worden verwaarloosd. Substitutie van Vergelijking (A-1) in Vergelijking (A-2) leidt dan tot de volgende vereenvoudigde waterbewegingsvergelijking:

$$\frac{\partial u}{\partial x}=\frac{u}{h\left(1-Fr^2\right)}\frac{\partial z_b}{\partial x}=0 \tag{A-3}$$

waarin Fr het Froudegetal voorstelt dat gedefinieerd wordt als

$$Fr=\frac{u}{\sqrt{gh}} \tag{A-4}$$

De massabalans voor het volledige sedimentmengsel laat zich schrijven als

$$\left(1-\varepsilon\right)\frac{\partial z_{\mathrm{b}}}{\partial t}+\frac{\partial q_{\mathrm{s}}}{\partial x}=0 \tag{A-5}$$

waarin

q_s = totaal volumetrisch sedimenttransport per eenheid van breedte, zonder poriën

(m^2/s)
t = tijd (s)
ε = porositeit (-)

Het sedimenttransport is een functie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid en de gemiddelde korrelgrootte van het sediment:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}u}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}D_m}\frac{\partial D_m}{\partial x} \tag{A-6}$$

waarin

D_m = gemiddelde korrelgrootte van sedimentmengsel (m)

Substitutie van deze vergelijking in Vergelijking (A-5) en eliminatie van $\partial u / \partial x$ door toepassing van Vergelijking (A-3) leiden tot

$$\frac{\partial z_\mathrm{b}}{\partial t} + \frac{u}{(1-\varepsilon)(1-Fr^2)h}\frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}u}\frac{\partial z_b}{\partial x} = -\frac{1}{(1-\varepsilon)}\frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}D_m}\frac{\partial D_m}{\partial x} \tag{A-7}$$

Deze vergelijking laat zich interpreteren als de weergave van een kinematische bodemliggingsgolf die wordt aangedreven door gradiënten in sedimentsamenstelling. De bijbehorende voortplantingssnelheid is

$$c_{bed} = \frac{u}{(1-\varepsilon)(1-Fr^2)h}\frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}u} \tag{A-8}$$

Deze relatie krijgt een eenvoudiger vorm door introductie van de mate van niet-lineariteit, b, van $q_s = q_s(u)$, die gedefinieerd wordt als $b = (u / q_s)(\mathrm{d}q_s / \mathrm{d}u)$. Het resultaat luidt

$$c_{bed} = \frac{bq_s}{(1-\varepsilon)(1-Fr^2)h} \tag{A-9}$$

Voor afzonderlijke sedimentfracties geldt de sedimentbalans

$$(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial p_{i,a}\delta}{\partial t} + p_i(z_0)\frac{\partial z_0}{\partial t}\right] + \frac{\partial q_{si}}{\partial x} = 0 \tag{A-10}$$

waarin

$p_{i,a}$ = relatieve aanwezigheid van sedimentfractie i in actieve laag (-)
$p_i(z_0)$ = relatieve aanwezigheid van sedimentfractie i op niveau z_0 (-)
q_{si} = volumetrisch transport van sedimentfractie i per eenheid van breedte, zonder poriën (m^2/s)

z_0 = niveau van bovenzijde van onderlaag (m + NAP)
δ = dikte van actieve laag (m)

De actieve-laagdikte wordt constant verondersteld, zodat $\partial z_0 / \partial t = \partial z_b / \partial t$. Het transport per fractie wordt geschreven als

$$q_{si} = p_{iT} q_s \tag{A-11}$$

waarin

p_{iT} = relatieve aanwezigheid van sedimentfractie i in bodemtransport (-)

Vervolgens wordt Vergelijking (A-5) gebruikt om $\partial q_s / \partial x$ te elimineren. Het resultaat is

$$(1-\varepsilon)\left[\delta \frac{\partial p_{i,a}}{\partial t} + \left(p_i(z_0) - p_{iT}\right)\frac{\partial z_b}{\partial t}\right] + q_s \frac{\partial p_{iT}}{\partial x} = 0 \tag{A-12}$$

Aangenomen wordt dat de onderlaag dezelfde samenstelling heeft als de actieve laag ($p_i(z_0) = p_{i,a}$) en dat de waarden van D_i constanten zijn voor de geselecteerde korrelgroottefracties. Vermenigvuldiging van alle termen met D_i en sommatie over alle fracties geeft dan

$$(1-\varepsilon)\left[\delta \frac{\partial D_m}{\partial t} + \left(D_m - D_{mT}\right)\frac{\partial z_b}{\partial t}\right] + q_s \frac{\partial D_{mT}}{\partial x} = 0 \tag{A-13}$$

met

$$D_m = \sum_i p_{i,a} D_i \tag{A-14}$$

$$D_{mT} = \sum_i p_{iT} D_i \tag{A-15}$$

Neemt men verder een constante verhouding aan tussen de gemiddelde korrelgrootte van het bodemtransport en de gemiddelde korrelgrootte van de actieve laag, dan is Vergelijking (A-13) te schrijven als

$$\frac{\partial D_m}{\partial t} + \frac{\mu q_s}{\delta(1-\varepsilon)}\frac{\partial D_m}{\partial x} = \frac{D_{mT} - D_m}{\delta}\frac{\partial z_b}{\partial t} \tag{A-16}$$

met

μ = verhouding tussen gemiddelde korrelgroottes van bodemtransport en actieve laag: $\mu = D_{mT} / D_m$ (-)

Deze vergelijking laat zich interpreteren als de weergave van een kinematische bodemsamenstellingsgolf die wordt aangedreven door veranderingen in bodemligging en het verschil tussen de samenstellingen van het bodemtransport en de bodem. De bijbehorende voortplantingssnelheid is

$$c_{mix} = \frac{\mu q_s}{\delta(1-\varepsilon)} \tag{A-17}$$

Omdat de twee kinematische golfvergelijkingen (A-7) en (A-16) via de forceringstermen onderling gekoppeld zijn, kunnen de daadwerkelijk optredende voortplantingssnelheden afwijken van de afzonderlijke voortplantingssnelheden c_{bed} en c_{mix}. De daadwerkelijk optredende voortplantingssnelheden, $c = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$, figureren in de vergelijkingen voor de totale differentialen of meebewegende afgeleiden:

$$\mathrm{d}z_b = \frac{\partial z_\mathrm{b}}{\partial t}\mathrm{d}t + \frac{\partial z_b}{\partial x}\mathrm{d}x = \left(\frac{\partial z_\mathrm{b}}{\partial t}\mathrm{d}t + c\frac{\partial z_b}{\partial x}\right)\mathrm{d}t \tag{A-18}$$

$$\mathrm{d}D_m = \frac{\partial D_m}{\partial t}\mathrm{d}t + \frac{\partial D_m}{\partial x}\mathrm{d}x = \left(\frac{\partial D_m}{\partial t}\mathrm{d}t + c\frac{\partial D_m}{\partial x}\right)\mathrm{d}t \tag{A-19}$$

Het stelsel van de vier vergelijkingen (A-7), (A-16), (A-18) en (A-19) heeft niet-triviale oplossingen als zijn coëfficiëntendeterminant gelijk is aan nul:

$$\begin{vmatrix} 1 & c_{bed} & 0 & \frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}D_m} \\ \frac{D_m - D_{mT}}{\delta} & 0 & 1 & c_{mix} \\ 1 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \end{vmatrix} = 0 \tag{A-20}$$

De oplossing hiervan luidt

$$c_{1,2} = \left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)_{1,2} = \frac{c_{bed} + c_{mix} + \xi}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{c_{bed}^2 - 2c_{bed}c_{mix} + c_{mix}^2 + 2\xi\left(c_{bed} + c_{mix}\right) + \xi^2} \tag{A-21}$$

met

$$\xi = \frac{\left(D_{mT} - D_m\right)}{\delta(1-\varepsilon)}\frac{\mathrm{d}q_s}{\mathrm{d}D_m} \tag{A-22}$$

Geldt $\xi = 0$, dan zijn de voortplantingssnelheden gelijk aan de waarden c_{bed} en c_{mix} van het ontkoppelde systeem. Geldt $\xi \neq 0$, dan beïnvloeden interacties tussen bodemligging en bodemsamenstelling de waarden van de voortplantingssnelheden.

WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl