

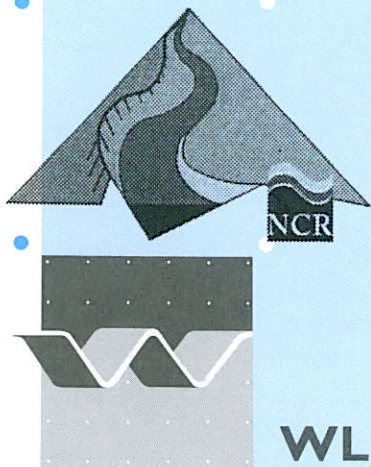
Opdrachtgever:

DG - Rijkswaterstaat

Interactie tussen ligging en samenstelling van de bodem rond de Pannerdensch Kop

Rapport

maart 2003



Q3178

wl | delft hydraulics

Opdrachtgever:

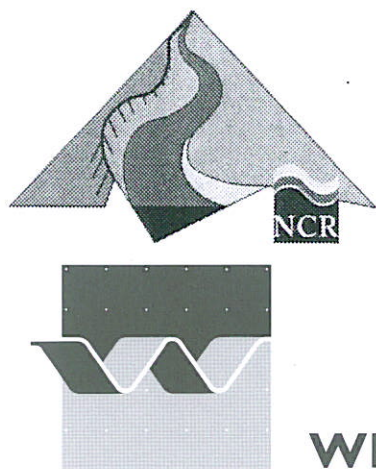
DG - Rijkswaterstaat

Interactie tussen ligging en samenstelling van de bodem rond de Pannerdensche Kop

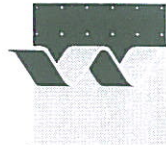
Erik Mosselman (redactie)

Rapport

maart 2003



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER:	Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat RIZA Postbus 9072 6800 ED Arnhem					
TITEL:	Interactie tussen ligging en samenstelling van de bodem rond de Pannerdensch Kop					
SAMENVATTING: De ontwikkeling van de ligging en de samenstelling van de rivierbodems in de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal rond de splitsing Pannerdensch Kop zijn berekend met het modelsysteem Delft3D. De berekeningen onderscheiden zich van eerdere berekeningen doordat nu gebruik is gemaakt van submodellen voor het transport van gegradeerd sediment en de vorming van alluviale bodemruwheid. Ze zijn uitgevoerd door de stagiair Michele Bernabè en de student Patrick Verhaar. De berekeningen geven inzicht in de interactie tussen de in de tijd ontwikkelende bodemsamenstelling en bodemligging. Er laten zich twee situaties onderscheiden: een situatie waarin de dikte van de actieve transportlaag dezelfde grootte-orde heeft als de waterdiepte en een situatie waarin deze dikte veel kleiner is dan de waterdiepte. In het eerste geval treden duidelijk wederzijdse beïnvloedingen op, terwijl in het tweede geval de bodemligging zo snel een bijpassend patroon van bodemsamenstelling forceert, dat de bodemligging zelf daarna niet meer kan veranderen. De rekenresultaten versterken eerdere aanwijzingen dat submodellen voor gegradeerd sediment en alluviale ruwheid daadwerkelijk noodzakelijk zijn voor een bruikbare tweedimensionale modellering van de morfologie van de Rijntakken rond de Pannerdensch Kop. Onduidelijk blijft vooralsnog in hoeverre deze noodzaak ook geldt voor de trajecten en splitsingen verder benedenstrooms, waar geen fijn grind meer in de bodem voorkomt. Dit rapport bevat niet alleen het feitelijke projectwerk van Michele Bernabè en Patrick Verhaar, maar ook een samenvatting van de resultaten uit voorgaande projecten, die tot nu toe alleen in briefvorm aan Rijkswaterstaat RIZA waren toegeleverd. Verder bevat dit rapport twee aan dit onderzoek gerelateerde artikelen, die zijn ingediend voor het komende RCEM Symposium in Barcelona (1-5 september 2003). In overleg met de opdrachtgever is vastgesteld dat dit rapport niet vertrouwelijk is, maar wordt ingebracht in de Morfologische Driehoek.						
REFERENTIES:	Numerieke analyse naar de interactie tussen bodemsamenstelling en bodemligging, overeenkomst RI-3731					
VER.	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	dr. ir. E. Mosselman		28 maart 2003		dr. ir. C.J. Sloff	drs. C.A. Bons
2	dr. ir. E. Mosselman		14 april 2003		dr. ir. C.J. Sloff	drs. C.A. Bons
PROJECTNUMMER		Q3178				
TREFWOORDEN:		riviermorfologie, sedimenttransport in rivieren, sedimentsamenstelling, Delft3D, Pannerdensch Kop				
AANTAL BLADZIJDEN		93				
VERTROUWELIJK		☐ JA, tot (datum)			☒ NEE	
STATUS:		☐ VOORLOPIG		☐ CONCEPT		☒ DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Aanpak.....	3
3	Resultaten	4
4	Conclusies	5
5	Literatuurverwijzingen.....	7
A	Hassan (2000) en Smale (2000)	A-1
	A.1 Inleiding.....	A-1
	A.2 Resultaten	A-1
	A.3 Voornaamste conclusies	A-4
	A.4 Aanbevelingen.....	A-4
B	Tussenrapportage Bernabè (2002).....	B-1
	B.1 Introduction	B-1
	B.2 Model characteristics	B-1
	B.2.1 Model area and representation.....	B-1
	B.2.2 Boundary conditions	B-4
	B.2.3 Sediment transport relations in uniform sediment version	B-5
	B.2.4 Sediment transport relations in graded sediment version	B-7
	B.2.5 Alluvial roughness predictor according to Van Rijn.....	B-8
	B.2.6 Alluvial roughness predictor according to Struiksma.....	B-9
	B.2.7 Grain size distribution.....	B-10
	B.3 Approach for investigations.....	B-13
	B.3.1 Cases	B-13
	B.3.2 Set-up in Delft3D.....	B-13

	B.3.3	Variation of modelling parameters	B-15
B.4		Results	B-22
	B.4.1	Introduction	B-22
	B.4.2	Case 1: Uniform sediment and constant roughness	B-22
	B.4.3	Case 2: Graded sediment approach with spatially homogeneous sediment properties and constant roughness	B-22
	B.4.3.1	Effect of the 2-D parameters on river bed morphology	B-23
	B.4.3.2	Effect of the sediment transport properties on river bed morphology	B-23
	B.4.3.3	Effect of initial bed levels on equilibrium bed levels	B-24
	B.4.4	Case 3: Graded sediment approach with spatial distribution of sediment properties and constant roughness	B-24
	B.4.5	Case 4: Alluvial roughness predictor approach with spatially homogeneous sediment properties	B-24
	B.4.6	Case 5: Graded sediment approach with homogeneous and spatially distributed sediment properties and alluvial roughness predictor	B-25
B.5		Conclusions	B-25
C		Tussenrapportage Verhaar (2003)	C-1
	C.1	Beschrijving model Pannerdensche Kop	C-1
	C.2	Beschrijving werk Bernabè	C-5
	C.3	Eigen simulaties	C-5
	C.4	Analyse	C-7
	C.4.1	Aanpassingen B13, om oscillaties te verminderen	C-7
	C.4.2	Mediane korrelgrootte	C-7
	C.4.3	Transport	C-8
	C.4.4	Debiet- en sedimentverdeling over Waal en Pannerdensch Kanaal	C-13
	C.5	Opmerkingen en bevindingen	C-14
	C.6	Conclusies en aanbevelingen	C-14

C.7	Figuren invloed breedtevariatie D_{50}	C-16
C.8	Figuren invloed richtingsformule	C-20
C.9	Figuren invloed morfologische randvoorwaarde	C-24
D	Aanbevelingen naar aanleiding van Frings & Kleinhans (2002)	D-1
D.1	Inleiding.....	D-1
D.2	Memo bij brief ZWS3663/Q3326/mh	D-1
D.3	Aanvullingen op memo bij brief ZWS3663/Q3326/mh.....	D-2
E	Artikel Mosselman et al (2003) voor RCEM Symposium in Barcelona.....	E-1
F	Artikel Sloff et al (2003) voor RCEM Symposium in Barcelona	F-1

I Inleiding

De morfologische ontwikkeling van riviersplitsingen vormt een van de belangrijkste onzekerheden in de grootschalige morfologische effectbepaling voor ingrepen in de Rijntakken. Dit onderwerp is daarom een speerpunt bij het samenwerkingsverband Morfologische Driehoek. Eerdere studies van de morfologie van de Rijntakken rond de Pannerdensch Kop hebben duidelijk gemaakt dat ruimtelijke variaties in korrel-samenstelling en bodemruwheid een belangrijke invloed hebben op de bodemligging (Struiksma, 1998; Mosselman & Sloff, 1998; Mosselman, Sieben, Sloff & Wolters, 1999; Hassan, 2000; Smale, 2000). Daarbij werden de ruimtelijke variaties steeds extern aan de berekeningen opgelegd en niet afgeleid uit een fysisch mechanisme dat deze variaties bewerkstelligt. De in dit rapport beschreven numerieke analyse beoogt deze tekortkoming gedeeltelijk op te heffen door expliciete modellering van uitgevingsmechanismen die optreden in mengsels van gegradeerd sediment. Hiervoor is gebruik gemaakt van een researchversie van Delft3D met functionaliteit op het gebied van erosie, transport en sedimentatie van gegradeerd sediment. Tevens zijn berekeningen uitgevoerd met een alluviale ruwheidsvoorspeller, die een fysisch mechanisme beschrijft voor het ontstaan van ruimtelijke variaties in bodemruwheid.

Het werk is aanvankelijk uitgevoerd door de Italiaanse stagiair Michele Bernabè in werkruimte van de groep Rivierkunde en Morfologie van WL | Delft Hydraulics. Omdat Michele tijdens de uitvoering van zijn werkzaamheden met onmiddellijke ingang een werkbetrekking in Italië aangeboden kreeg, heeft hij de werkzaamheden bij WL | Delft Hydraulics voortijdig moeten afbreken. Zijn werk is vervolgens overgenomen door de student Patrick Verhaar van de Technische Universiteit Delft. Deze gebruikt het werk als afstudeeronderzoek en zet zijn analyses daarom ook nog voort na de beëindiging van het project.

Erik Mosselman was de projectleider en stelde ook dit rapport samen. Michele Bernabè en Patrick Verhaar werden verder begeleid door een team van nauw betrokken adviseurs, bestaande uit Tillmann Baur, Bert Jagers, Cor Flokstra en Kees Sloff.

Arjan Sieben was de projectbegeleider vanuit Rijkswaterstaat RIZA. Het project is bij Rijkswaterstaat bekend onder overeenkomstnummer RI-3731 en bij WL | Delft Hydraulics onder projectnummer Q3178.

De uitgevoerde berekeningen geven inzicht in de interactie tussen de in de tijd ontwikkelende bodemsamenstelling en bodemligging, zowel in het geval van een constante bodemruwheid als in het geval van een bodemruwheid die zich instantaan aan de stroming aanpast op basis van alluviale ruwheidsvoorspellers. Als voorlopige conclusie laten zich twee situaties onderscheiden: een situatie waarin de dikte van de actieve transportlaag dezelfde grootte-orde heeft als de waterdiepte en een situatie waarin deze dikte veel kleiner is dan de waterdiepte. In het eerste geval treden duidelijk wederzijdse interacties op, terwijl in het tweede geval de bodemligging zo snel een bijpassend patroon van bodemsamenstelling forceert, dat de bodemligging zelf daarna niet meer kan veranderen.

De berekeningen versterken verder de aanwijzingen dat submodellen voor gegradeerd sediment en alluviale ruwheid daadwerkelijk noodzakelijk zijn voor een bruikbare tweedimensionale modellering van de morfologie van de Rijntakken rond de Pannerdensche Kop. Onduidelijk blijft vooralsnog in hoeverre dit ook geldt voor de trajecten en splitsingen verder benedenstrooms, waar geen fijn grind meer in de bodem voorkomt.

In deze rapportage is ervoor gekozen om niet alleen het werk van Michele Bernabè en Patrick Verhaar vast te leggen, maar ook de resultaten uit voorgaande projecten die tot nu toe alleen in briefvorm aan Rijkswaterstaat RIZA waren toegeleverd. Verder zijn twee aan dit onderzoek gerelateerde artikelen toegevoegd. Deze zijn ingediend voor het komende RCEM Symposium in Barcelona (1-5 september, 2003). Al deze producten zijn als bijlagen opgenomen.

2 Aanpak

De ontwikkeling van de ligging en de samenstelling van de rivierbodems rond de Pannerdensch Kop zijn berekend met het modelsysteem Delft3D. Daarbij is gebruik gemaakt van de module FLOW (voor een enkele laag), een sedimenttransportmodule en een bodemveranderingsmodule, aangestuurd door de module MAIN. Tezamen vormen deze modules een op riviertoepassingen gericht subsysteem van Delft3D dat ook wel wordt aangeduid met de naam Delft2D-Rivers¹. De sedimenttransportmodule was TRSTOT voor uniform sediment en TRSGRA voor gegradeerd sediment. De bijbehorende bodemveranderingsmodule was respectievelijk BOTTOM voor uniform sediment en BOTGRA voor gegradeerd sediment. Deze verschillende modules maakten het mogelijk om de voorspelkracht van Delft3D met gegradeerd sediment te vergelijken met de voorspelkracht van Delft3D zonder gegradeerd sediment.

Naast berekeningen met een constante bodemruwheid zijn ook berekeningen met een alluviale ruwheidsvoorspeller uitgevoerd. Hiervoor is een procedure in MATLAB geschreven die automatisch Delft3D in een aantal iteratieslagen aanroept. Beginnend met een homogene bodemruwheid werd de berekening een aantal malen herhaald totdat de ruimtelijke verdeling van de alluviale ruwheid pastte bij het stroombeeld.

De rekenresultaten zijn vergeleken met bodempeilingen uit de periode 1988-91, bodempeilingen van Gruijters et al (2001), bodemsamenstellingen uit het Sobek Rijntakkenmodel en bodemsamenstellingen van Gruijters et al (2001).

Bij de formulering van de conclusies zijn niet alleen de resultaten uit deze berekeningen in beschouwing genomen, maar ook de resultaten uit de eerdere studies van Hassan (2000) en Smale (2000).

¹ Het ruimere subsysteem van Delft3D waarin naast de modules FLOW (voor een enkele laag), een sedimenttransportmodule en een bodemveranderingsmodule ook de module WAVE wordt aangestuurd door MAIN, wordt Delft3D-MOR genoemd.

3 Resultaten

De resultaten van Bernabè (2002) en Verhaar (2003) zijn bij dit rapport opgenomen als Bijlagen B en C. Het werk van Verhaar (2003) betreft overigens slechts een tussenrapportage, omdat zijn afstudeeronderzoek aan de Technische Universiteit Delft nog niet is afgerond.

De resultaten van het voorgaande werk door Hassan (2000) en Smale (2000) zijn als Bijlage A eveneens in dit rapport opgenomen. Bijlage D bevat verder aanbevelingen voor de morfologische modellering van de Pannerdensch Kop die zijn opgesteld naar aanleiding van het werk van Frings & Kleinhans (2002). De Bijlagen E en F bevatten twee artikelen die zijn ingediend voor het komende RCEM Symposium in Barcelona. Het artikel van Mosselman, Hassan & Sieben (2003) in Bijlage E is voornamelijk gebaseerd op het werk van Hassan (2000). Het artikel van Sloff, Bernabè & Baur (2003) in Bijlage F is gebaseerd op het werk van Bernabè (2002) en de eerste resultaten van Verhaar (2003).

4 Conclusies

Uit de verschillende studies kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

1. Ruimtelijke variaties in sedimentkorrelgrootte en bodemruwheid beïnvloeden de bodemtopografie rond de Pannerdensch Kop en de verdeling van de sedimenttransporten over de Rijntakken benedenstrooms van de Pannerdensch Kop.
2. Hoewel ijking van de bodemtopografie rond de Pannerdensch Kop mogelijk is onder de aannamen van riviertaksgewijs uniform sediment en constante bodemruwheid, zijn de aanwijzingen inmiddels zeer sterk dat submodellen voor gegradeerd sediment en alluviale ruwheid noodzakelijk zijn bij de tweedimensionale modellering. Onduidelijk is voornamelijk in hoeverre dit ook geldt voor de trajecten en splitsingen verder benedenstrooms, waar geen fijn grind meer in de bodem voorkomt.
3. De noodzaak van goede submodellen voor gegradeerd sediment en alluviale ruwheid houdt in dat detailprocessen van sedimenttransport, duinvorming en sortering nader onderzoek verdienen. Aanbevolen wordt om de in de Morfologische Driehoek participerende universiteiten te interesseren voor onderzoek waarbij deze detailprocessen experimenteel onderzocht worden en gemodelleerd worden op basis van de onderliggende fysische processen. Hierbij zal met vrucht gebruik gemaakt kunnen worden van recente vorderingen in turbulentiemodellering en de modellering van verticale sortering in duinen.
4. De sedimentverdeling op het splitsingspunt hangt sterk af van de instelling van de modelparameters en de randvoorwaarden.
5. De berekende bodemsamenstelling geeft overal grover sediment dan in de metingen van Gruijters et al (2001). De waarden in het Pannerdensch Kanaal stemmen nog het beste overeen. In vergelijking met de breedtegemiddelde korrelgroottes in het Sobek Rijntakkenmodel, zijn de berekende sedimentkorrels te fijn in het Pannerdensch Kanaal en wat grover in de Bovenrijn en de Waal.
6. Bernabè (2002) vindt een goede overeenstemming tussen gemeten en berekende bodemliggingen in zijn Case 5 met gegradeerd sediment en een alluviale ruwheidsvoorspeller. Verhaar (2003) ontdekt echter dat de overeenstemming tussen gemeten en berekende bodemsamenstellingen in Case 5 helemaal niet goed is. Een nadere analyse laat zien dat de aanpassing van de bodemsamenstelling in Case 5 veel sneller verloopt dan de aanpassing van de bodemligging. De initiële bodemligging forceert als het ware zeer snel een bijpassende bodemsamenstelling, waarna zij zelf geen veranderingen meer kan ondergaan. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de in de berekening gehanteerde actieve transportlaag van het gegradeerde sediment veel kleiner is dan de waterdiepte. Inderdaad trad dit verschijnsel niet op in berekeningen voor de gootproeven van Olesen (1985), waar de actieve-laagdikte en de waterdiepte minder ver uit elkaar liggen. Onderzocht zal worden of deze verklaring juist is en of de dikte van de actieve laag niet eigenlijk groter gekozen moet worden om realistische resultaten te verkrijgen.

7. Als de bodemsamenstelling zich veel sneller aanpast dan de bodemligging, vormt zich bij elke initieel opgegeven bodemligging een eigen bijbehorend patroon van bodemsamenstelling. Dit betekent in feite dat het systeem verschillende evenwichtstoestanden kent.
8. Als de bodemsamenstelling zich veel sneller aanpast dan de bodemligging, hebben de parameters in de formule voor het effect van bodemdwarshellingen op de richting van het sedimenttransport geen invloed op de uiteindelijke bodemligging. Ze hebben echter wel invloed op het uiteindelijke patroon van de bodemsamenstelling. Gebleken is dat de thans beschikbare formule voor het effect van bodemdwarshellingen bij gegradeerd sediment nog verre van volmaakt is. Nader experimenteel onderzoek aan dit effect wordt aanbevolen.
9. Als de bodemsamenstelling zich op dezelfde tijdschaal aanpast als de bodemligging, vormt de bodemsamenstelling een forcering van de bodemligging. Daarbij worden de hoogteverschillen in de bodemtopografie gereduceerd ten opzichte van de situatie met uniform sediment zonder ruimtelijke variaties. Deze reductie kan men zien als het resultaat van een competitie tussen het principe dat sediment grover wordt in zones van hoge stroomsnelheden en het principe dat sedimentatie optreedt in zones van grover sediment.
10. Afvoervariaties zijn tot nu toe verwaarloosd. Dat de afvoeren feitelijk in de tijd variëren houdt in dat (1) gemeten bodemliggingen en bodemsamenstellingen niet representatief zijn voor een bij een bepaalde constante afvoer behorend evenwicht en dat (2) de computerberekeningen niet alle relevante invloedsfactoren meenemen.
11. Als de lokale sedimentkorrelgroottes zich niet snel genoeg kunnen aanpassen aan de wisselende omstandigheden ten gevolge van afvoervariaties, ontstaat een persistent bodemsamenstellingspatroon dat werkt als een forcering van de bodemtopografie.
12. Een door Flokstra ontwikkeld nieuw numeriek schema heft de bodemoscillaties bij het stagnatiepunt op die geconstateerd werden door Bernabè (2002), Verhaar (2003) en hun voorgangers Struiksma en Van den Brink. Dit nieuwe schema is thans alleen in een aparte researchversie beschikbaar en wordt nog verder verbeterd.

5 Literatuurverwijzingen

- Bernabè, M. (2002), Bed level and bed material interaction in river morphology; Case study for bifurcation at Pannerdensch Kop with Delft3D. Traineeship report, WL | Delft Hydraulics (letter ZWS3333/Q3178/mh dated November 1, 2002, to Rijkswaterstaat RIZA).
- Blom, A. (2003), A continuum vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes. Ph.D. Thesis, Twente University, Enschede, the Netherlands.
- Boersma, B.J. & R. Uittenbogaard (2003), Surface stress distributions and secondary motion in the turbulent flow above a wavy surface. Submitted to Journal of Fluid Mechanics.
- Egiazaroff, I.V. (1965): Calculation of non-uniform sediment concentrations. J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 91, No. 4, pp. 225-248.
- Frings, R.M. & M.G. Kleinhans (2002), Sedimentsortering en transportlaagdynamiek; Geologische, antropogene en alluviale invloeden op de beddingsamenstelling van de Rijn rond de Pannerdensch Kop. ICG Rapport 02/7, Netherlands Centre For Geo-ecological Research.
- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink & J.H.A. Bosch (2001), De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensch Kop. Eindrapport, NITG 01-166-B, TNO-NITG.
- Hansen, J.L., M. van Hecke, A. Haaning, C. Ellegaard, K.H. Andersen, T. Bohr & T. Sams (2001), Pattern formation – Instabilities in sand ripples. Nature, 410, 6826, p.324.
- Hassan, K.I. (2000), Effect of spatial grain size variations on morphology of straight alluvial channels. M.Sc. Thesis H.H.379, IHE Delft.
- Julien, P.Y. & G.J. Klaassen (1995), Sand-dune geometry of large rivers during floods. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.121, No.9, pp.657-663.
- Lanzoni, S. (1997), Experiments on free and forced bar formation in a straight flume; Volume II: Graded sediment. Report Q1774, Delft Hydraulics.
- Lanzoni, S. & M. Tubino (1999), Grain sorting and bar instability. Journal of Fluid Mechanics, 393, pp.149-174.
- Lanzoni, S. (2000), Experiments on bar formation in a straight flume; 2. Graded sediment. Water Resources Research, AGU, 36, 11, pp.3351-3363.
- 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 (1998), Probleemanalyse ijking Delft3D voor Pannerdense Kop. Verslag Q2494, WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E., A. Sieben, K. Sloff & A. Wolters (1999), Effect of spatial grain size variations on two-dimensional river bed morphology. Proc. IAHR Symp. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, 6-10 Sept. 1999, Vol. I, pp.499-507.
- Mosselman, E., K.I. Hassan & J. Sieben (2003), Effect of spatial grain size variations in two-dimensional morphological computations with uniform sediment. Paper submitted to 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Barcelona, Spain, 1-5 September 2003.
- Olesen, K.W. (1985), Experiments with graded sediment in the DHL curved flume. Report on experimental investigation, R657-XXII, M1771, Delft Hydraulics Laboratory.
- Rijn, L.C. van (1984), Sediment transport, Part III: bed forms and alluvial roughness. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.110, No.12, pp.1733-1754.
- Sloff, C.J., M. Bernabè & T. Baur (2003), On the stability of the Pannerdense Kop river bifurcation. Paper submitted to 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Barcelona, Spain, 1-5 September 2003.
- Smale, A.J. (2000), Morphological effects of spatially varying grain size and bed roughness in rivers. M.Sc. Thesis, Delft University of Technol., Faculty of Civil Engrg. and Geosciences, Hydraulic and Offshore Engrg. section, October 2000.
- Struiksmā, N. & A. Crosato (1989), Analysis of a 2-D bed topography model for rivers. In: River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Eds. S. Ikeda & G. Parker, pp.153-180.

- Struiksma, N. (1998), Morfologisch model Pannerdense Kop op basis van DELFT2DMOR; IJking. Verslag rekenonderzoek, Q2403, WL | Delft Hydraulics.
- Talmon, A.M., N. Struiksma & M.C.L.M. van Mierlo (1995), Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes. J. Hydr. Res., IAHR, Vol.33, No.4, pp.495-517.
- Verhaar, P. (2003), Tussenrapportage sedimenttransport op splitsingspunten in waterlopen. TU Delft & WL | Delft Hydraulics, maart 2003.

A Hassan (2000) en Smale (2000)

A.1 Inleiding

In 2000 zijn twee sterk verwante onderzoeken uitgevoerd:

- het afstudeerwerk van Hassan (2000) aan het IHE, begeleid door WL | Delft Hydraulics op eigen kosten;
- het afstudeerwerk van Smale (2000) aan de TU Delft, door WL | Delft Hydraulics begeleid in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA (opdrachtbon 36081 / WSR d.d. 17 mei 2000).

Per brief aan Rijkswaterstaat RIZA met kenmerk ZWS5832/Q2736 vatte WL | Delft Hydraulics op 7 december 2000 de resultaten samen in een notitie met eigen interpretaties, conclusies en aanbevelingen. De voornaamste onderdelen van deze notitie zijn hieronder in bewerkte vorm overgenomen.

A.2 Resultaten

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gevallen die in de onderzoeken van Hassan (2000) en Smale (2000) berekend zijn. Daarbij is aangegeven of de oeverlijnen van de rivier recht of gekromd zijn, en of de banken gedwongen worden op hun plaats te blijven ("vast") of door de rivier kunnen migreren ("vrij"). De rechte waterlopen zijn door Hassan (2000) berekend, de gekromde waterlopen door Smale (2000). De vrije, wandelende zandbanken zijn aan de bovenrand van het model met een random generator opgewekt.

Casus				Belangrijkste resultaten en conclusies
Omschrijving	oeverlijnen	banken	concept voor ruimtelijke variaties	
Hypothetisch experiment met heterogeen sediment in rechte goot van Struiksmā & Crosato (1989), met dwarsdam over halve breedte bovenstrooms	recht	vast	D(x,y)	De banken nemen de golflengte aan van het D(x,y)-patroon. Ze worden derhalve volledig door de ruimtelijke variaties in sedimentkorrelgrootte geforceerd. De voor homogeen sediment gevonden respons op de dwarsdam wordt onderdrukt. De banken ontstaan waar het sediment grof is, terwijl de diepere geulen ontstaan waar het sediment fijn is. Dit komt doordat sedimentatie optreedt op plaatsen waar de transportcapaciteit lager is en erosie op plaatsen waar de transportcapaciteit hoger is. Dat dit tegengesteld is aan wat in de natuur wordt waargenomen, laat zich verklaren uit het ontbreken van een uitzevingsmechanisme (zoals het D(u)-concept).
			D(u)	Beginnend met homogeen beddingmateriaal wordt de berekening iteratief uitgevoerd totdat de ruimtelijke verdeling van korrelgroottes past bij het snelheidsveld. In het begin wordt dan ook dezelfde bodem gevonden als in de echte proeven van Struiksmā & Crosato (1989). In de daarop volgende iteratiestap vindt men een ruimtelijk korrelgroottepatroon met dezelfde golflengte als de voor het homogene sediment gevonden respons. Daarbij zijn de bodemligging en het snelheidsveld echter "omgeklapt": in

Casus				Belangrijkste resultaten en conclusies
Omschrijving	oever-lijnen	banken	concept voor ruimtelijke variaties	
				tegenfase ten opzichte van het aanvankelijke patroon. Dit komt overeen met wat voor het $D(x,y)$-concept gevonden was. De banken ontstaan waar het sediment grof en dus de transportcapaciteit laag is, terwijl de diepere geulen ontstaan waar het sediment fijn en dus de transportcapaciteit hoog is. In de daaropvolgende iteratiestappen wordt echter geleidelijk van bovenstrooms naar benedenstrooms een patroon opgebouwd waarbij de korrelgroottes passen bij het snelheidsveld. De banken worden langer en sterker gedempt, hetgeen overeenkomt met het theoretische gedrag in de lineaire analyse van Mosselman & Sloff (1998) en Mosselman et al (1999). De berekeningen suggereren dat men de sterkere demping kan zien als een manifestatie van de competitie tussen enerzijds “harder stromen waar het sediment fijner is” en anderzijde “grover sediment waar het harder stroomt”. De resulterende geringere amplitude is in lijn met Lanzoni (1997, 2000) en Lanzoni & Tubino (1999).
Hypothetisch experiment met heterogeen sediment in rechte goot van Struiksma & Crosato (1989), met random generator bovenstrooms	recht	vrij	$D(x,y)$	Voor $D(x,y)$ is dezelfde functie aangehouden als in de berekening voor plaatsvast banken (zonder random generator, met dwarsdam). Het blijkt dat dan tevens dezelfde plaatsvast banken ontstaan. Deze banken onderdrukken het voorkomen van de migrerende banken die men vindt in een berekening met homogeen bedding-sediment.
Experiment van Olesen (1985) in gekromde goot	krom	vast	$D(x,y)$	De in de berekening gebruikte $D(x,y)$ -verdeling is een schematisatie van de gemeten $D(x,y)$ -verdeling. Deze is in fase verschoven ten opzichte van de bodemtopografie. De berekening geeft daarmee een tweede, gesuperponeerde bodemgolf die in de metingen niet of slechts zeer zwak is terug te vinden. De eigenschappen van deze bodemgolf komen goed overeen met de theoretisch voorspelde respons van amplitude en faseverschuiving op een extern opgelegde $D(x,y)$ -verdeling. Het effect in de berekening kan in de eerste helft van de goot onderdrukt worden door aan te nemen dat de lokale Chézy-waarde een functie $C(D)$ of $C(h)$ is van respectievelijk de sedimentkorrelgrootte of de waterdiepte. Voor $C(D)$ wordt dan niet de lokale D genomen maar D op een bepaalde afstand bovenstrooms (Chézy-waardenveld in fase verschoven). Voor $C(h)$ wordt niet het actuele h -veld genomen, maar het h -veld dat berekend is in de situatie met homogene bodemruwheid.
			$D(u)$	Deze berekening is niet uitgevoerd, maar er is gecontroleerd in hoeverre de resultaten voor het $D(x,y)$ -concept overeenstemmen met een $D(u)$ -verdeling. Geconcludeerd wordt dat $D(x,y)$ en $D(u)$ niet overstemmen. Het is daarbij niet duidelijk in hoeverre de gemeten sedimentkorrelgrootteverdeling al een evenwicht had bereikt.
Waalbocht bij Nijmegen	krom	vast	$D(x,y)$	De in de berekening gebruikte $D(x,y)$ -verdeling is een schematisatie van de gemeten $D(x,y)$ -verdeling. Deze is in fase verschoven ten opzichte van de bodemtopografie. De berekening geeft nauwelijks verschillen te zien ten opzichte van de berekening met homogeen beddingmateriaal, hetgeen te verklaren is uit een dominante invloed van de bocht. Toch valt ook hier een tweede, gesuperponeerde bodemgolf te onderscheiden die in de metingen niet of slechts zeer zwak is terug te vinden. De eigenschappen van deze bodemgolf komen redelijk overeen met de theoretisch voorspelde respons van amplitude en faseverschuiving op

Casus				Belangrijkste resultaten en conclusies
Omschrijving	oeverlijnen	banken	concept voor ruimtelijke variaties	
				een extern opgelegde $D(x,y)$ -verdeling. Het effect in de berekening kan onderdrukt worden door aan te nemen dat de lokale Chézy-waarde een functie $C(D)$ of $C(h)$ is van respectievelijk de sedimentkorrelgrootte of de waterdiepte. Voor $C(D)$ wordt dan niet de lokale D genomen maar D op een bepaalde afstand bovenstrooms (Chézy-waardenveld in fase verschoven). Voor $C(h)$ is daarbij niet het actuele h-veld genomen, maar het h-veld dat berekend is in de situatie met homogene bodemruwheid.
			$D(u)$	Deze berekening is niet uitgevoerd, maar er is gecontroleerd in hoeverre de resultaten voor het $D(x,y)$ -concept overeenstemmen met een $D(u)$ -verdeling. Geconcludeerd wordt dat $D(x,y)$ en $D(u)$ niet overstemmen. Dat wordt mede verklaard uit de variërende afvoeren, waardoor in het prototype het snelheidsveld voortdurend verandert. De naijlende ruimtelijke verdeling van beddingmateriaal kan dan nooit een $D(u)$ -verdeling aannemen.
Pannerdense Kop	krom	vast	$D(x,y)$	De in de berekening gebruikte $D(x,y)$ -verdeling is een schematisatie van de gemeten $D(x,y)$ -verdeling. Deze is in fase verschoven ten opzichte van de bodemtopografie. Terwijl een berekening met homogeen beddingmateriaal tot een goede reproductie van het prototype leidde, verschuift de $D(x,y)$ -verdeling de ondiepe bochtovergangen zodanig dat het niet meer lukt om het model te ijken. Ook hier kunnen de verschillen gezien worden als een tweede, gesuperponeerde bodemgolf die in de metingen niet of slechts zeer zwak is terug te vinden. De eigenschappen van deze bodemgolf komen redelijk overeen met de theoretisch voorspelde respons van amplitude en faseverschuiving op een extern opgelegde $D(x,y)$ -verdeling. Het effect in de berekening kan onderdrukt worden door aan te nemen dat de lokale Chézy-waarde een functie $C(D)$ of $C(h)$ is van respectievelijk de sedimentkorrelgrootte of de waterdiepte. Voor $C(D)$ wordt dan niet de lokale D genomen maar D op een bepaalde afstand bovenstrooms (Chézy-waardenveld in fase verschoven). Voor $C(h)$ is daarbij niet het actuele h-veld genomen, maar het h-veld dat berekend is in de situatie met homogene bodemruwheid. Het effect van een alluviale ruwheidsvoorspeller volgens van Rijn (1984) en Julien & Klaassen (1995) is onderzocht via een iteratieve berekening. Beginnend met homogeen beddingmateriaal is de berekening een aantal malen herhaald totdat de ruimtelijke verdeling van de alluviale ruwheid past bij het stroombeeld. Het blijkt dat daardoor de verdeling van sediment op de splitsing zodanig verbeterd dat geen aanzanding meer optreedt in het Pannerdens Kanaal.
			$D(u)$	Deze berekening is niet uitgevoerd, maar er is gecontroleerd in hoeverre de resultaten voor het $D(x,y)$ -concept overeenstemmen met een $D(u)$ -verdeling. Geconcludeerd wordt dat $D(x,y)$ en $D(u)$ niet overstemmen. Dat wordt mede verklaard uit de variërende afvoeren, waardoor in het prototype het snelheidsveld voortdurend verandert. De naijlende ruimtelijke verdeling van beddingmateriaal kan dan nooit een $D(u)$ -verdeling aannemen.

A.3 Voornaamste conclusies

1. Mosselman, Sieben, Sloff & Wolters (1999) onderscheiden twee modelconcepten voor ruimtelijke variaties in sedimentkorrelgrootte: een D(u)-concept waarin de lokale sedimentkorrelgrootte afhangt van de lokale stroming en een D(x,y)-concept waarin de lokale sedimentkorrelgrootte extern geforceerd wordt. De onderzoekers stellen dat het D(u)-concept het beste aansluit bij de fysische uitzettingsprocessen die in de natuur optreden, terwijl het D(x,y)-concept het beste aansluit bij de manier waarop ruimtelijke variaties worden opgegeven in een numeriek model. Nu blijkt echter dat het D(x,y)-concept ook beter dan het D(u)-concept aansluit bij de fysische processen in de natuur wanneer sprake is van belangrijke afvoervariaties. De lokale sedimentkorrelgroottes kunnen zich dan niet snel genoeg aanpassen aan de wisselende stroomsnelheden.
2. Smale (2000) vindt dat de berekende verdeling van sedimenttransporten over de takken van een riviersplitsing gevoelig is voor de toegepaste alluviale ruwheidsvoorspeller. Een alluviale ruwheidsvoorspeller volgens van Rijn (1984) en Julien & Klaassen (1995) leidt tot een verbetering van de verdeling op de Pannerdense Kop. Bodemruwheidsonderzoek lijkt daarom van groot belang voor zowel het tweedimensionaal morfologisch modelleren van de Pannerdense Kop als voor de definitie van een goede knooppuntsrelatie voor de sedimentverdelingen in eendimensionale modellen.
3. Het onderzoek heeft tot nu toe geen antwoord gegeven op de vraag of het compenserende effect van ruimtelijke variaties in bodemruwheid een toevalstreffer is voor de Rijntakken in de huidige situatie, of een algemene eigenschap van de Rijntakken of zelfs een universeel verschijnsel.
4. Het onderzoek heeft tot nu toe nog geen antwoord gegeven op de vraag onder welke voorwaarden men kan volstaan met morfologische berekeningen met *uniform* sediment en onder welke voorwaarden morfologische berekeningen met *gegradeerd* sediment noodzakelijk zijn.
5. Het onderzoek heeft tot nu toe nog geen antwoord gegeven op de vraag of rekenen met *gegradeerd* sediment automatisch impliceert dat men ook een alluviale ruwheidsvoorspeller toe moet passen.

A.4 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om in onderling overleg te bepalen hoe vervolgonderzoek het beste ingericht kan worden om de volgende vragen te beantwoorden:

- Wat is een goede alluviale ruwheidsvoorspeller, mede gezien het belang van deze voorspeller voor de verdeling van het sedimenttransport over de riviertakken? Naijleffecten in ruimte en tijd zijn daarbij waarschijnlijk van belang.
- Theoretische analyses en numerieke berekeningen suggereren dat het effect van ruimtelijke variaties in bodemmateriaal op de morfologie van de Pannerdense Kop gecompenseerd wordt door ruimtelijke variaties in bodemruwheid. Is dit een toevalstreffer voor de Rijntakken in de huidige situatie, of is dit een algemene eigenschap van de Rijntakken of zelfs een universeel verschijnsel?
- Onder welke voorwaarden kan men volstaan met morfologische berekeningen met *uniform* sediment? Onder welke voorwaarden zijn morfologische berekeningen met *gegradeerd* sediment noodzakelijk?
- Impliceert rekenen met *gegradeerd* sediment automatisch dat men ook een alluviale ruwheidsvoorspeller toe moet passen?

B Tussenrapportage Bernabè (2002)

B.1 Introduction

The morphological development around bifurcation points in rivers represents one of the cases where prediction of large-scale morphological effects of river engineering measures is still quite unreliable. Especially for the Rhine branches, this topic is part of a number of studies which are currently being carried out. Earlier investigations of the bifurcation around the Pannerdensch Kop showed that spatial variation of the grain size distribution and bed roughness have an important effect on the bed level development (Struiksma 1998; Mosselman & Sloff, 1998; Mosselman, Sieben, Sloff & Wolters, 1999; Hassan, 2000; Smale, 2000). In these studies, the spatial distribution of river characteristics was imposed to the computations as boundary condition without determining it on the basis of physical relations. Numerical analysis sometimes considers this shortcoming by modelling grain sorting effects that occur with graded sediment fractions. A research version of Delft2D-Rivers with functionalities for erosion, transport and sedimentation as well as a different version with an alluvial roughness predictor are now available.

The present study contains a numerical analysis on:

- the interaction between the bed material and the bed level changes for the case of constant bed roughness;
- the interaction between the bed material and bed level changes for the case of an alluvial roughness that adapts to the flow conditions.

The study will contribute to answer the question under which conditions (sedimentary characteristics, river geometry, etc.) models with constant roughness and constant grain size can be applied to reproduce river morphology with a good degree of accuracy.

This report has been prepared by Michele Bernabè in the framework of his traineeship at WL | Delft Hydraulics in the period July-October 2002. Technical support and supervision were provided by Tillmann Baur, Bert Jagers and the project leader Erik Mosselman.

The main purpose of this intermediate report is to document the computations carried out by Michele. Further analyses are still in progress. This report is hence not final.

B.2 Model characteristics

B.2.1 Model area and representation

The model area covers the bifurcation of the Bovenrijn into the Waal and the Pannerdensch Kanaal and is represented by a computational grid as shown in Figure B.1.

The upstream boundary is located at Rkm 862.8, the downstream boundaries at Rkm 870.6 and Rkm 871.2 for the Waal and Pannerdensch Kanaal respectively. The river system is

schematized with 85 by 21 grid cells, with a size of approximately 100 x 20 metres. Two data sets for the initial bathymetry are used in the study. The first set originates from measurements between 1988 and 1991. The second was obtained by Gruijters et al (2001) but does not cover the whole model area. Consequently, combination with bed levels from the first data set was necessary in the upstream and downstream parts of the river bed. The two bed topographies are presented in Figures B.2 and B.3.

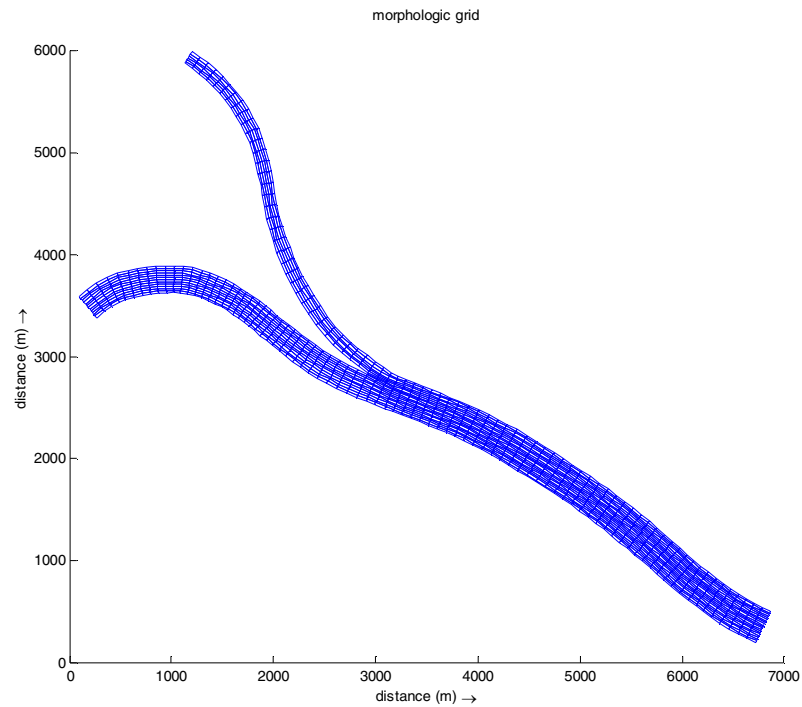


Figure B.1: Numerical grid of the bifurcation of the Bovenrijn river at Pannerden

Some observations about the measurements of Gruijters et al (2001): Dredging was carried out at the northern bank of the Waal at the downstream part of the river reach where measurements were taken. Dredging took place shortly before the measurement campaign. However, no material was dumped back to the river at the southern bank. So the measurements at the southern bank of the Waal are without any effect of human impact. To reduce the effect of dredging as much as possible, the measurements had been stopped in the dredging locations for several weeks.

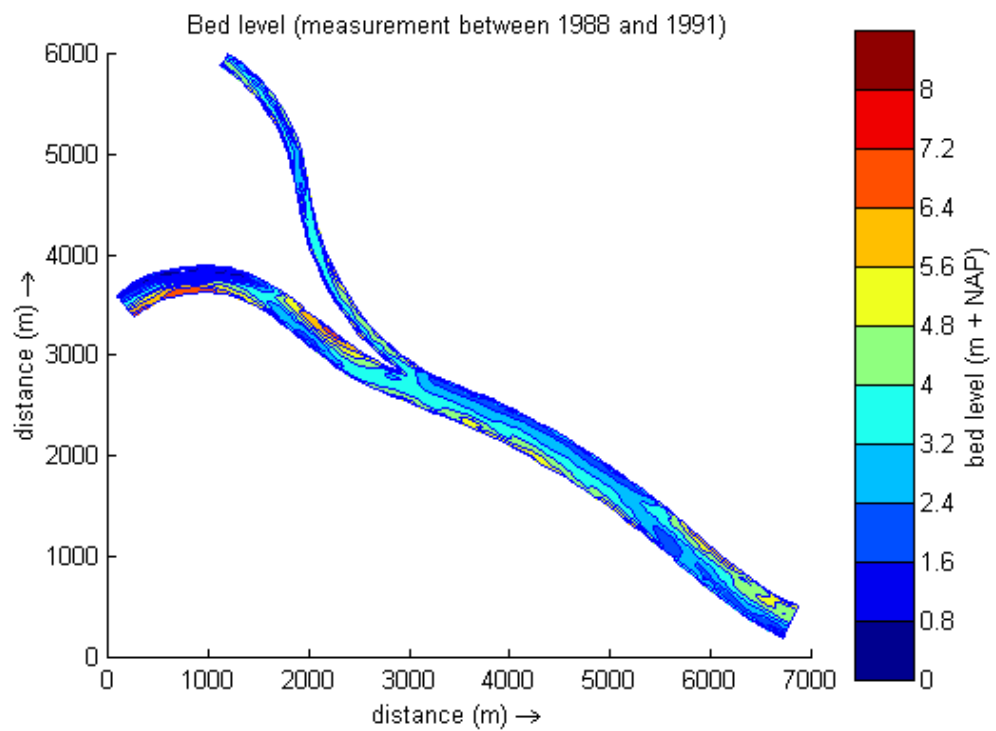


Figure B.2: Bed topography (measurement between 1988 and 1991)

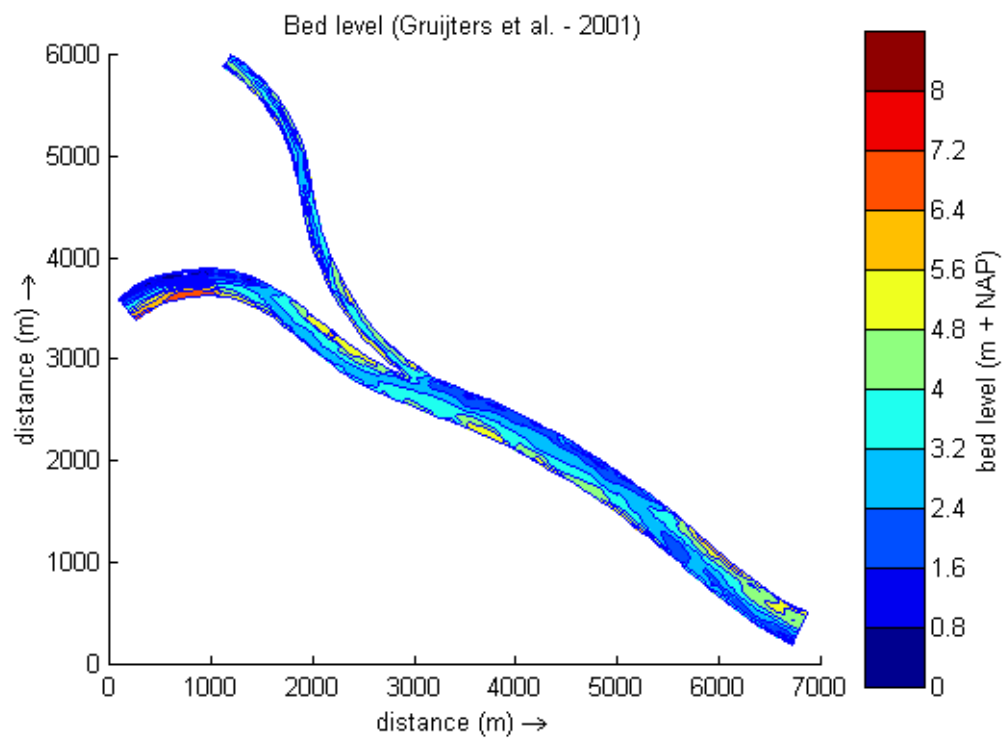


Figure B.3: Bed topography Gruijters et al (2001)

B.2.2 Boundary conditions

The upstream hydraulic boundary condition has been defined as a discharge of $2400 \text{ m}^3/\text{s}$, which is spatially distributed over the cross-section as shown in Figure B.4 in agreement with the Chézy-formulation. This formulation is based on the assumption that the discharge is proportional to the water depth to the power 1.5.

The downstream boundary condition is a water level of $9.57 \text{ m} + \text{NAP}$ and $9.54 \text{ m} + \text{NAP}$ in the Waal and Pannerdensche Kanaal respectively.

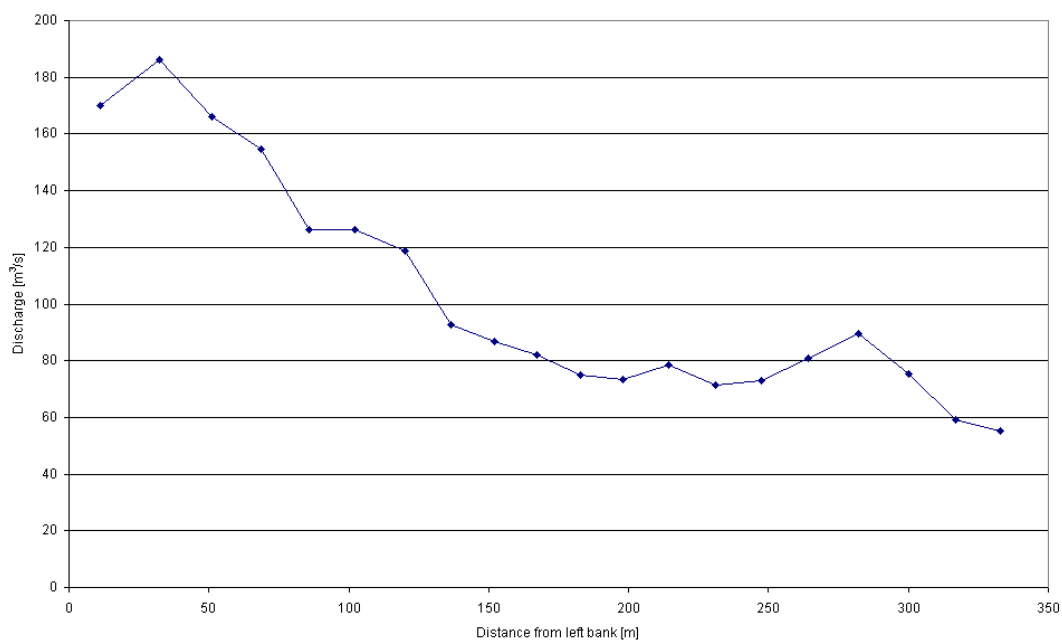


Figure B.4: Cross-section distribution of upstream inflow discharge (times 2040/2400 by mistake)

For the morphological computations, sediment transport at the upstream boundary is assumed to be equal to the transport capacity; so, the bed level at the upstream boundary is fixed at the initial bed topography. Furthermore, the initial water levels were determined from earlier computations using fixed bed levels in which equilibrium conditions had been reached. Figure B.5 shows the appropriate water depths for the initial conditions with the bed level measured between 1998 and 1991.

Table B.1 shows the governing parameters for the bifurcation at Pannerdensche Kop.

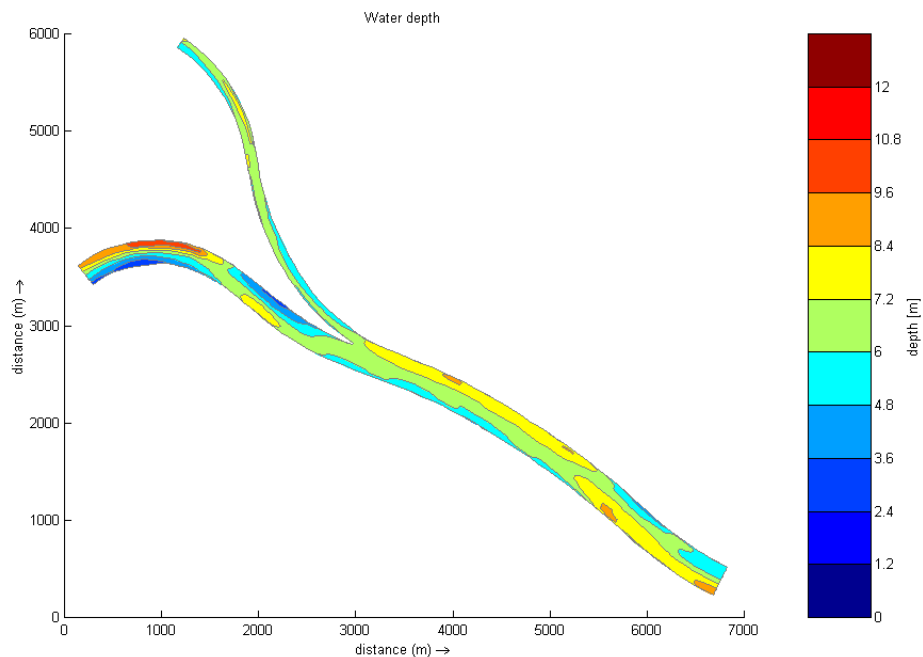


Figure B.5: Initial water depth for bed topography measured between 1988 and 1991

Table B.1: Governing parameters

Q [m ³ /s]	B [m]	C_U [m ^{1/2} /s]	C_V [m ^{1/2} /s]	v_U [m ² /s]	v_V [m ² /s]
2400	330	45	45	0.1	0.1

B.2.3 Sediment transport relations in uniform sediment version

The Transport module determines the sediment transports for a 2D horizontal area at pre-set times. A fixed bed level is assumed when the user-defined sediment transport relation calculates the transports. The direction of sediment transport may include effects of bed level gradients and spiral motion.

Two different transport relations have been used: the Meyer-Peter-Müller formula and the General formula.

Meyer-Peter-Müller (1948)

The Meyer-Peter-Müller formula includes a critical shear stress for transport. It reads:

$$S = 8.0\alpha d(\Delta g D_{50})^{0.5}(\mu\vartheta - \vartheta_{cr})^{1.5}$$

where:

- α : calibration coefficient
- d : mean particle diameter
- D_{50} : median percentage diameter

g: acceleration due to gravity
 Δ : relative density of sediment
 μ ripple factor
 $\mathfrak{G}_{cr}$: critical mobility parameter (=0.047)

and:

$$\mathfrak{G} = \left(\frac{q}{C} \right)^2 \frac{1}{\Delta D_{50}}$$

in which q is the magnitude of the flow velocity (m/s).

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$$

The ripple factor reads:

$$\mu = \min \left[\left(\frac{C}{C_{gr}} \right)^{1.5}, 1.0 \right]$$

where:

$$C_{gr} = 18 \log_{10} \left(\frac{12h}{D_{90}} \right)$$

The mean particle diameter (d) is about 1.1 to 1.3 times larger than the D_{50} diameter for nearly uniform material.

General formula

The general sediment transport relation has the structure of the Meyer-Peter-Müller formula, but all coefficients and powers can be adjusted to fit the user requirements. It reads:

$$S = \alpha d (\Delta g D_{50})^{0.5} \mathfrak{G}^b (\mu \mathfrak{G} - \mathfrak{G}_{cr})^c$$

The following parameters have to be specified:

α : calibration coefficient
b: power
c: power
 $\mathfrak{G}_{cr}$: critical mobility parameter

B.2.4 Sediment transport relations in graded sediment version

The sediment transport relation that has been used to compute the local transport rates of each sediment fraction in the graded sediment transport approach is the Meyer-Peter and Müller formula (MPM):

$$s_{bi} = A_{cal} \frac{8.0 \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_i^3}}{1.0 - \varepsilon_p} T^{3/2}$$

where:

A_{cal} :	calibration factor
s_{bi} :	total bed-load transport per unit of width of fraction i
T :	transport parameter
Δ :	relative density of sediment
ε_p :	constant packing factor of the bed (bed porosity)
D_i :	grain size of fraction i

If the transport parameter T is less than zero, the total bedload transport is taken equal to zero. Two versions of this MPM formula are distinguished following their evaluation of the transport parameter T :

- version ME1: the transport parameter contains two empirical constants: M_1 (the ripple factor μ) and M_2 (related to the critical Shields parameter) to be introduced by the user:

$$T = \frac{\bar{u}^2 M_1}{C^2 \Delta D_i} - \zeta_i(D_i, D_m) \cdot M_2$$

- version ME2: the transport parameter involves the computation of a Chézy C_{90} coefficient with respect to grains to express the ripple factor as $(C/C_{90})^{3/2}$. The critical Shields parameter is 0.047.

$$T = \frac{\bar{u}^2}{C_{90} \sqrt{C_{90} C \Delta D_i}} - 0.047 \cdot \zeta_i(D_i, D_m)$$

The Chézy coefficient with respect to the grains is defined as:

$$C_{90} = 18 \log_{10} \left(\frac{12 \cdot h}{n \cdot D_{90}} \right)$$

Here:

D_{90} :	grain size for which 90% of the material is smaller
D_m :	mean grain diameter of the bed material
h :	water depth
n :	factor, usually taken equal to 3

In both versions the hiding-and-exposure effect is introduced according to Egiazaroff (1965):

$$\zeta_i = 0.85 \cdot \frac{D_m}{D_i} \quad \text{if } \frac{D_i}{D_m} < 0.469638$$

$$\zeta_i = \left[\frac{\log_{10}(19.0)}{\log_{10}(19.0 D_i / D_m)} \right]^2 \quad \text{if } \frac{D_i}{D_m} \geq 0.469638$$

B.2.5 Alluvial roughness predictor according to Van Rijn

Reference: Van Rijn (1984).

The relative sediment density:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Characteristic grain size:

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3}$$

Characteristic mobility parameter according to Shields

$$\theta_c = 0.24 D_*^{-1} \quad \text{als } D_* \leq 4$$

$$\theta_c = 0.14 D_*^{-0.64} \quad \text{als } 4 < D_* \leq 10$$

$$\theta_c = 0.04 D_*^{-0.1} \quad \text{als } 10 < D_* \leq 20$$

$$\theta_c = 0.013 D_*^{0.29} \quad \text{als } 20 < D_* \leq 150$$

$$\theta_c = 0.055 \quad \text{als } D_* > 150$$

Critical shear velocity to the square

$$u_{*,c}^2 = g\Delta D_{50} \theta_c$$

Equivalent Nikuradse roughness for the grain size

$$k'_s = 3D_{90}$$

Chézy coefficient related to the grain size

$$C' = 18^{10} \log \left(\frac{12h}{k'_s} \right)$$

Shear velocity for the grain size to the square

$$(u'_*)^2 = \frac{g}{(C')^2} \bar{u}^2$$

Transport parameter

$$T = \frac{(u'_*)^2 - u_{*,c}^2}{u_{*,c}^2}$$

Estimated height of dunes

$$H = 0.11h \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T) \quad \text{if} \quad 0 < T < 25$$

$$H=0 \quad \text{else}$$

Estimated length of dunes

$$L = 7.3h$$

Total equivalent Nikuradse roughness

$$k_s = k'_s + 1.1H(1 - e^{-25H/L})$$

with

D_{50} : gemiddelde korreldiameter (m)

D_{90} : diameter overschreden door 10% van de korrels (m)

g : zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)

h : waterdiepte (m)

$\bar{u}$: effectieve dieptegemiddelde snelheid (m/s)

ν : kinematische viscositeit water (m^2/s)

ρ_s : dichtheid sediment (kg/m^3)

ρ_w : dichtheid water (kg/m^3)

B.2.6 Alluvial roughness predictor according to Struiksma

Referentie: *Eenvoudig kalibreerbare alluviale ruwheidsvoorspeller*, unpublished manuscript by N. Struiksma.

De relatieve dichtheid van sediment

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

Chézy coëfficiënt gerelateerd aan de korrels

$$C' = A_1^{10} \log \left(\frac{A_2 h}{D_{90}} \right)$$

Shields parameter gerelateerd aan de korrels

$$\theta' = \frac{\bar{u}^2}{(C')^2 \Delta D_{50}}$$

Dimensieloze ruwheidsfunctie

$$M = 1 - \frac{\theta_c}{\theta'} \frac{\theta' - \theta_c}{(\theta_m - \theta_c)^2} \left(\theta' - \frac{\theta_m^2}{\theta_c} \right) \left(\left(\frac{C'}{C_m} \right)^2 - 1 \right)$$

Chézy coëfficiënt voor de totale ruwheid (als $\theta' < 1$)

$$C = C' \quad \text{als} \quad \theta' \leq \theta_c$$

$$C = \frac{C'}{\sqrt{M}} \quad \text{anders}$$

waarbij

D_{50} : gemiddelde korreldiameter (m)

D_{90} : diameter overschreden door 10% van de korrels (m)

- h : waterdiepte (m)
 $\bar{u}$: effectieve dieptegemiddelde snelheid (m/s)
 ρ_s : dichtheid sediment (kg/m^3)
 ρ_w : dichtheid water (kg/m^3)

en

- A_1 : eerste kalibratiefactor in relatie korreldiameter en Chézy waarde ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)
 A_2 : tweede kalibratiefactor in relatie korreldiameter en Chézy waarde (-)
 θ_c : kritische Shields parameter (-)
 θ_m : Shields parameter bij minimale Chézy waarde (-)
 C_m : Minimale Chézy waarde ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)

B.2.7 Grain size distribution

The grain size distribution in the model is based on two data sets. Firstly, a distribution of an existing SOBEK model has been applied that yields a median grain size D50 of 3.19 mm, 1.88 mm and 4.71 mm for the Bovenrijn, Waal and Pannerdensch Kanaal respectively (see Figure B.6). The grain size is spatially homogeneous in each of the three river branches (see Figure B.7). Secondly, measurements of Gruijters et al (2001) with a spatial distribution of grain size frequencies have been used (see Figure B.8).

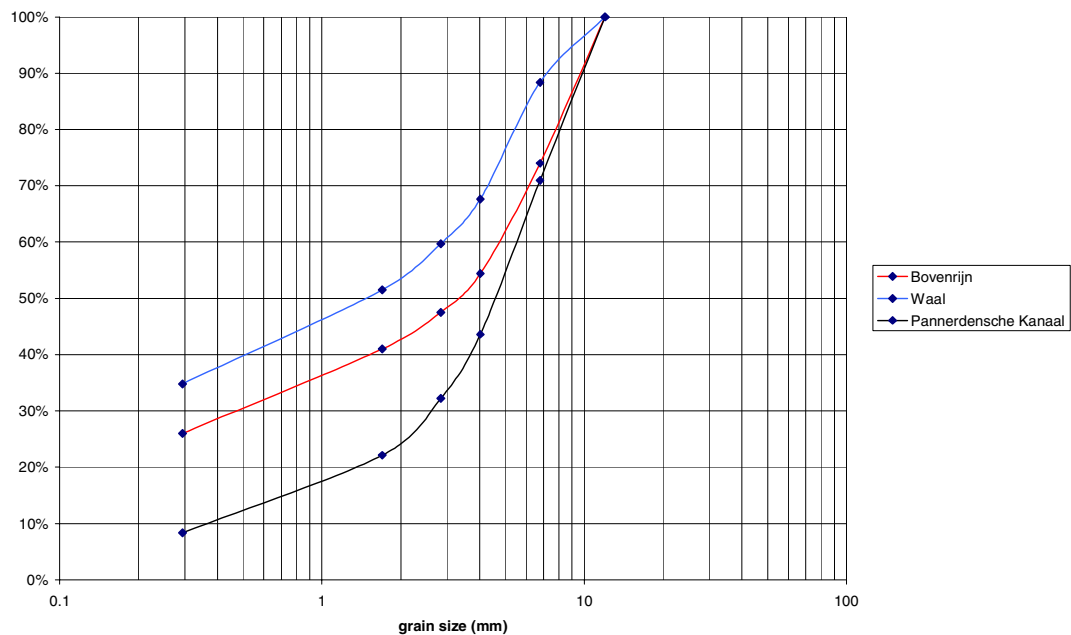


Figure B.6: Granulometric curve of grain sizes according to the SOBEK model (6 fractions)

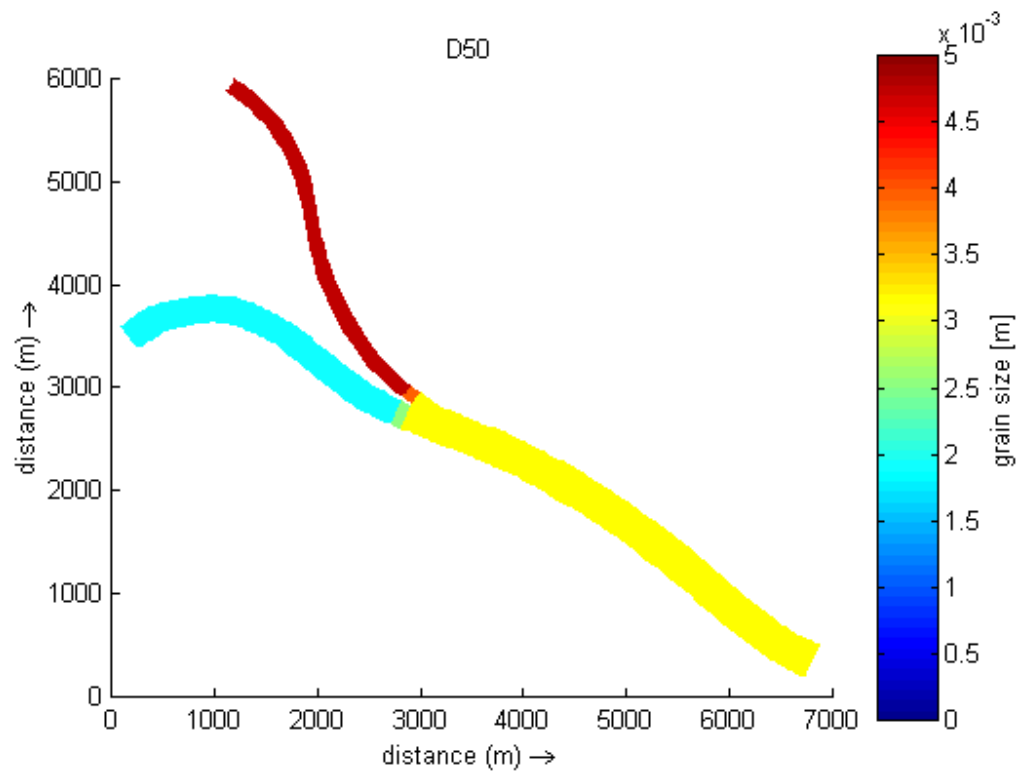


Figure B.7: Distribution of D_{50} from Sobek model

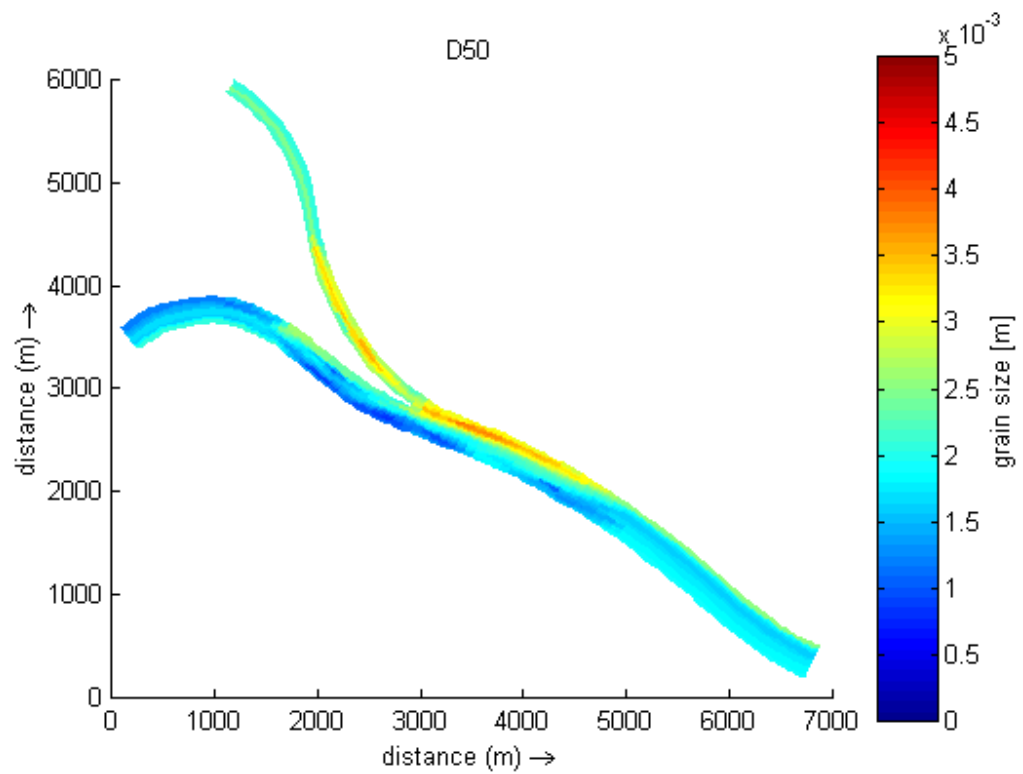


Figure B.8: D_{50} according to measurements of Gruijters et al (2001) (6 fractions)

In some computations the same data set of Gruijters et al (2001) including seven fractions has been used. The seventh class contains the coarsest material between 0.0125 m and 0.0315 m (see last row of Table B.2).

Table B.2: Grain size distribution in Gruijters data set

n. of classes	d_i (mm)	d_{i+1} (mm)
1	0.06	1.0
2	1.0	2.0
3	2.0	2.8
4	2.8	4.0
5	4.0	8.0
6	8.0	12.5
7	12.5	31.5

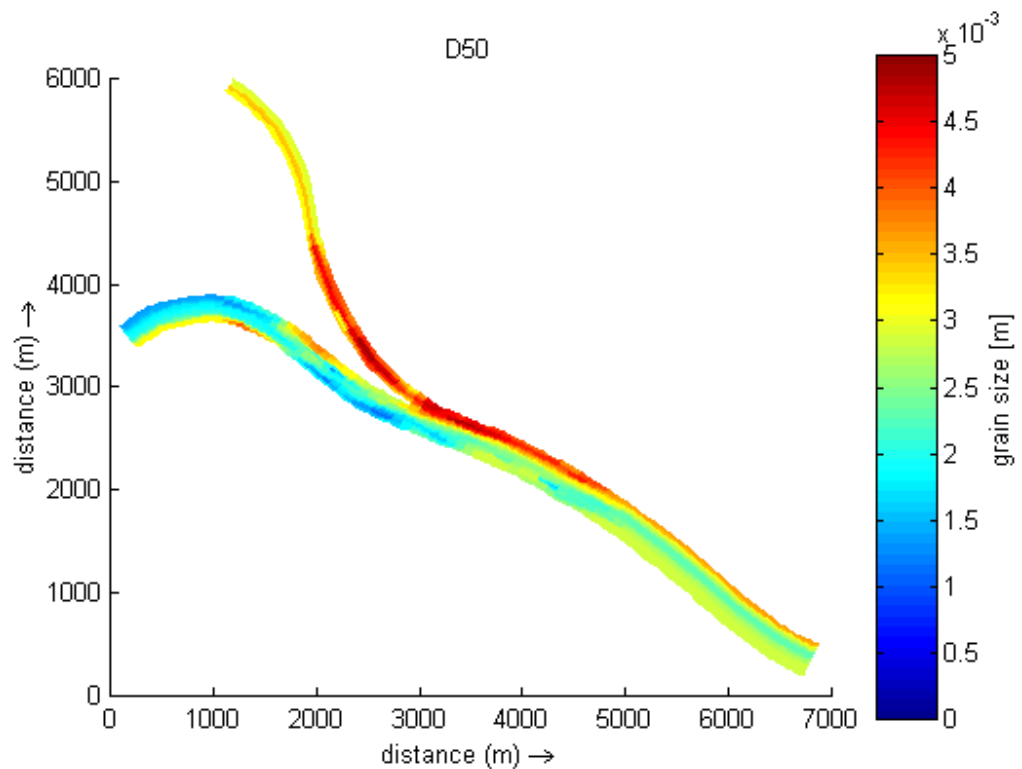


Figure B.9: D_{50} according to measurements of Gruijters et al (2001) (7 fractions)

B.3 Approach for investigations

B.3.1 Cases

In the study the following cases have been considered:

- **Case 1**, with uniform sediments and constant bed roughness;
- **Case 2**, with spatially homogeneous graded sediment and constant bed roughness;
- **Case 3**, with spatial distribution of graded sediment properties according to Gruijters et al (2001) and constant bed roughness;
- **Case 4**, with uniform sediments and alluvial roughness predictor;
- **Case 5**, with graded sediment and alluvial roughness combined.

B.3.2 Set-up in Delft3D

In Delft2D-MOR the module MAIN controls the execution of the process simulation. The control function of the module MAIN concerns the starting of the process, the splitting up of the total simulation time into time intervals, the splitting up of the process into subprocesses, the activation and deactivation of the process modules and the process termination. The output of the MAIN module, the communication file, allows exchange of data between the modules FLOW, TRSTOT (or TRSGRA) and BOTTOM.

The process tree used consists of two branches that control the hydrodynamic and the morphological modules separately. When stationary boundary conditions are used (constant discharge and constant water levels), there is a distinct difference between the hydrodynamic and morphological time frame. In fact the hydrodynamic computations do not change the morphological time frame. This implies that the FLOW module must use the morphological time frame as a reference.

The applied stop criteria and time management options are shown in Table B.3. The process tree is executed in the following order:

- 1) A flow simulation is made at Node 2. The node is executed once (NoE=1) to prepare water level and current data for the morphological module;
- 2) The TRANSPORT and BOTTOM modules are executed consecutively at Node 3. The <Stop Criterion> for Node 3 is a pre-set number of executions equal to four (NoE=4).

Controller 1 controls the actual morphological process tree. This node is executed a fixed number of times.

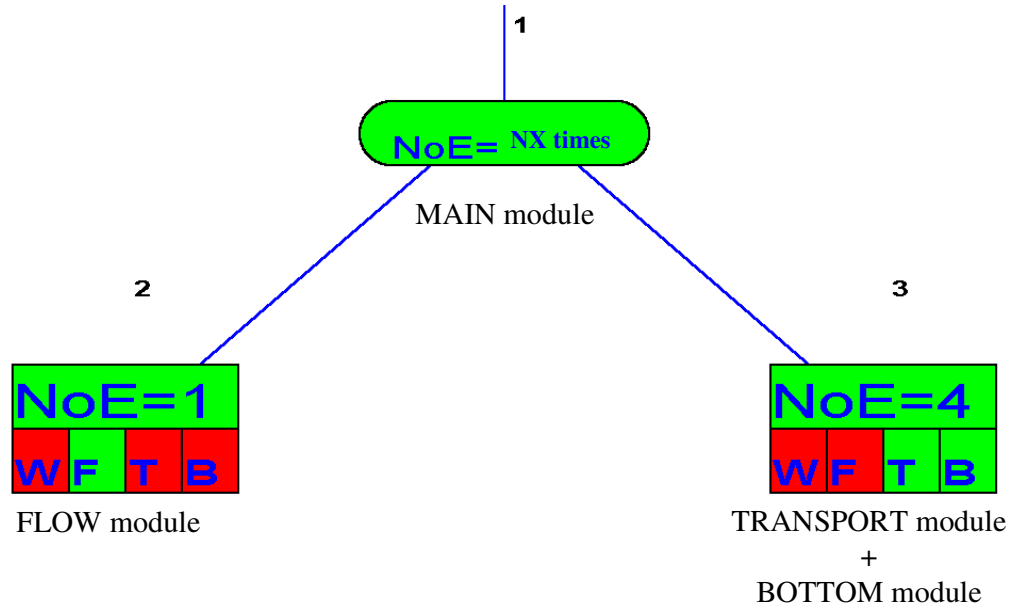


Figure B.10: Process tree

Table B.3: Time of process management

	FLOW module	TRANSPORT module	BOTTOM module
time scale	11.25 s	automatic morphological time step	
relative stop time	40 [Tscale]	-	-
duration of iteration	7.5 [min]	variable	
stop criterion	1 execution	4 executions	

The morphological time step is determined automatically by using the Courant number. All simulations use CRNT=0.3 The Bottom module has to satisfy a Courant stability criterion in the sediment transport direction:

$$\sigma = \frac{c_{bed} \Delta t}{\Delta x}$$

in which σ is the Courant number, Δt and Δx are the time step and the grid increment in the transport direction and c_{bed} can be interpreted as the bed level celerity (i.e. velocity of a bottom disturbance). This bed level celerity is the central parameter in the spatially varying stability correction. The Bottom time step should satisfy the Courant stability condition so that both stability and accuracy are satisfied. In all simulations an automatic time stepping was used. For this reason the optimum BOTTOM time step usually changes during a morphodynamic simulation.

B.3.3 Variation of modelling parameters

For Cases 1 to 3, an analysis has been carried out for every key parameter for 2-D morphology as well as for each key parameter for the erosion, transport and deposition of (graded) sediment. The parameters for 2-D morphology are:

- *ESPIR*: coefficient to calibrate the effect of the spiral motion as computed by the FLOW module on the bed in cross-sectional direction;
- *ASHLD*: coefficient to calibrate the effect of the bed slope on the direction of sediment transport;
- *BSHLD*: exponent to calibrate the same effect;

and for Cases 2 and 3 also:

- *CSHLD*: exponent to calibrate the hiding and bed form effects on the directions of sediment transport;
- *DSHLD*: exponent to calibrate the effect of varying grain sizes on the direction of sediment transport.

The latter parameters are used in the formula for the direction of the bed-load transport containing the shape function f :

$$f(\theta_i, D_i / h, D_m / D_i) = A_{sh} \Theta_i^{B_{sh}} \left(\frac{D_i}{h} \right)^{C_{sh}} \left(\frac{D_m}{D_i} \right)^{D_{sh}}$$

The parameters for the sediment transport are:

- median grain size D_{50} (grain size of 50% of the material is smaller);
- θ_{CR} : critical mobility parameter;
- the ripple factor parameters (only Case 1): ripple or efficiency factor;

and for Cases 2 and 3 also:

- the transport layer thickness;
- the initial grain size frequency distribution of each fraction;
- the number of fractions.

Additionally, the initial bed levels were changed in two test computations for Case 2 and Case 3 using the bed level according to Gruijters et al (2001).

All computations have been carried out by changing only one modelling parameter so that the effect of individual parameters can be investigated. For the Cases 4 and 5, preliminary computations were done without a detailed sensitivity analysis of the calibration parameters.

Details are given in the tables below that show all the modelling parameters for the computations of the different cases. The parameters in red indicate the parameter that has been successively adapted compared to the previous computations. Yellow backgrounds indicate computations with oscillations in the bed levels.

Table B.4: Parameters of Case 1

	P20	B01	B02	B02_bis	B02_ter	B13	B18
Roughness							
C (direct. U)	45	45	45	45	45	45	45
C (direct. V)	45	45	45	45	45	45	45
uniform/variable	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform
Grain size [mm]							
n. of classes	1	1	6	6	7	6	6
D ₅₀ BR	2.53	2.00	3.19	3.19	variable	3.19	3.19
D ₅₀ WA	2.53	2.00	1.88	1.88	variable	1.88	1.88
D ₅₀ PK	2.53	2.00	4.71	4.71	variable	4.71	4.71
Helical flow							
ESPIR	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ASHLD	0.85	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD							
DSHLD							
Transverse bed slope							
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport fomula							
	general formula	general formula	general formula	general formula	general formula	MEYER-PETER-MULLER	MEYER-PETER-MULLER
(MPM)							
ACAL	7.977	2.7	2.7	2.7	2.7	0.8	0.8
B (power)	2.3	0	0	0	0		
CC (power)	0	1.5	1.5	1.5	1.5		
RMU/M1 (ripple facor/efficiency)	1	1	1	1	1	from file	from file
THCR/M2	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.047	0.047
N (only if IFORM=2)							
DEFORAC (thickness transport layer)							
Stability							
ALFSTA	1.0	15.0	15.0	1.0	15.0	15.0	40.0
NSTAB	6	1	1	6	1	1	4
BB	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
CRNMAX	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Time management							
Total Executions	400 times	4401	4401	2841	4401	4400	
TSCALE	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25
Number EXECUTIONS flow/Stop	1	1	1	1	1	1	1
Parameter							
Quantity name							
Rel. stop time for FLOW module	40	40	40	40	40	40	40
Number EXECUTIONS transport+bottom	4	4	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module	80	80	80	80	80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.055	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.033	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Table B.5: Parameters of Case 2, part 1

CASE 2								
	Van Cor	B03	B03_bis	B05	B06	B07	B08	B09
Roughness			spldatab.dep					
C (direct. U)	45	45	45	45	45	45	45	45
C (direct. V)	45	45	45	45	45	45	45	45
uniform/variable	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform
Grain size [mm]								
n. of classes	6	6	6	6	6	6	6	6
D ₅₀ BR	3.19	3.19	3.19	2.00	3.19	3.19	3.19	2.00
D ₅₀ WA	1.88	1.88	1.88	2.00	1.88	1.88	1.88	2.00
D ₅₀ PK	4.71	4.71	4.71	2.00	4.71	4.71	4.71	2.00
Helical flow								
ESPIR	1.5	1.0	1.0	1.0	1.5	0.8	1.0	1.0
ASHLD	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.8	2.8
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD	0	0	0	0	0	0	0	0
DSHLD	0	0	0	0	0	0	0	0
Transverse bed slope								
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport fomula	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2
(MPM)								
ACAL	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B (power)	0							
CC (power)	1.5							
RMU/M1 (ripple facor/efficiency)	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable
THCR/M2	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
N (only if IFORM=2)	--	3	3	3	3	3	3	3
DEFORAC (thickness transport layer)		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Stability								
ALFSTA								
NSTAB	-							
BB	-							
CRNMAX	-							
Time management	-							
Total Executions	400 times	11923	24001	5337	16000	10713	21849	27221
TSCALE	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT
Number EXECUTIONS flow/Stop Parameter	drop below parameters	1	1	1	1	1	1	1
Quantity name	U1							
Rel. stop time for FLOW module		40	40	40	40	40	40	40
Number EXECUTIONS transport+botton	4	4	4	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module		80	80	80	80	80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Table B.6: Parameters of Case 2, part 2

CASE 2/2					
	B10	B11	B12	B14	B15
Roughness					
C (direct. U)	45	45	45	45	45
C (direct. V)	45	45	45	45	45
uniform/variable	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform
Grain size [mm]					
n. of classes	6	6	6	6	6
D ₅₀ BR	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19
D ₅₀ WA	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88
D ₅₀ PK	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
Helical flow					
ESPIR	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0
ASHLD	1.4	1.2	1.4	1.4	1.4
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD	0	0	0	0.3	0
DSHLD	0	0	0	0	0.5
Transverse bed slope					
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport fomula	MEYER-PETER-MULLER ME2	MEYER-PETER-MULLER ME2	MEYER-PETER-MULLER ME2	MEYER-PETER-MULLER ME2	MEYER-PETER-MULLER ME2
(MPM)					
ACAL	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B (power)					
CC (power)					
RMU/M1 (ripple facor/efficiency)	variable	variable	variable	variable	variable
THCR/M2	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
N (only if IFORM=2)	1	3	1	3	3
DEFORAC (thickness transport layer)	0.2	0.2	50	0.2	0.2
Stability					
ALFSTA					
NSTAB		-			
BB		-			
CRNMAX		-			
Time management		-			
Total Executions	20793	13661	3944	80001	80001
TSCALE	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT
Number EXECUTIONS flow/Stop Parameter	1	drop below parameters		1	1
Quantity name		U1			
Rel. stop time for FLOW module	40		40	40	40
Number EXECUTIONS transport+bottom	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module	80		80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Table B.7: Parameters of Case 3

	B16	B16_bis	B17	B17_bis	B20
Roughness					
C (direct. U)	45	45	45	45	45
C (direct. V)	45	45	45	45	45
uniform/variable	uniform	uniform	uniform	uniform	uniform
Grain size [mm]	Sobek bathy	Sobek bathy	Grujters bath	Grujters bath	Sobek bathmet
n. of classes	6	6	6	6	7
D ₅₀ BR	variable	variable	variable	variable	D50_7_cl.dep
D ₅₀ WA	variable	variable	variable	variable	D50_7_cl.dep
D ₅₀ PK	variable	variable	variable	variable	D50_7_cl.dep
Helical flow					
ESPIR	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ASHLD	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD	0	0	0	0	0
DSHLD	0	0	0	0	0
Transverse bed slope					
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport fomula	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME1	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2
(MPM)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ACAL					
B (power)					
CC (power)					
RMU/M1 (ripple facor/efficiency)	variable	1	variable	variable	variable
THCR/M2	0.047	0.02	0.047	0.047	0.047
N (only if IFORM=2)	3	3	3	3	3
DEFORAC (thickness transport layer)	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Stability					
ALFSTA					
NSTAB					
BB					
CRNMAX					
Time management					
Total Executions	80001	16001	80001	80001	80001
TSCALE	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT
Number EXECUTIONS flow/Stop Parameter	1	1	1	1	1
Quantity name					
Rel. stop time for FLOW module	40	40	40	40	40
Number EXECUTIONS transport+bottom	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module	80	80	80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Table B.8: Parameters of Case 4

CASE 4	Van Kees	B401	B402	B403	B404	B405	B406	B407	B409	B410
Roughness										
C (direct. U)	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable
C (direct. V)	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable	variable
Grain size [mm]		Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy	Sobek bathy
n. of classes		6	6	6	6	6	6	6	6	6
D ₅₀ BR	2	3.189	3.189	3.189	3.189	3.189	3.189	3.189	3.189	3.189
D ₅₀ WA	2.00	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88
D ₅₀ PK	2.00	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
Helical flow										
ESPIR	1	1	1	1	1.5	0.8	1	1	1	1
ASHLD	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.8	2.8	1.4	1.4
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DSHLD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transverse bed slope										
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport formula	general formula	general formula	MPM	general formula	general formula	general formula	general formula	general formula	general formula	general formula
ACAL			0.8							
B (power)	2.7	6.4		2.7	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
CC (power)	0	0		0	0	0	0	0	0	0
RMU/M1 (ripple factor/efficiency)	1.5	1.5		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
THCR/M2	1	1		1	1	1	1	1	1	1
N (only if IFORM=2)	0.02	0.02		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
DEFORAC (thickness transport layer) --	--	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Stability										
ALFSTA	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
NSTAB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BB	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
CRNMAX	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Time management										
Total Executions	80001	16001	80001	80001	80001	80001	80001	80001	80001	80001
TSCALE	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT	by CRNT
Number EXECUTIONS flow/Stop	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Parameter										
Quantity name										
Rel. stop time for FLOW module	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Number EXECUTIONS transport+bottom	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Table B.9: Parameters of Case 5

CASE 5						
	B501	B502	B503	B504	B505	B506
Roughness						
C (direct. U)	variable	variable	45	variable	variable	variable
C (direct. V)	variable	variable	45	variable	variable	variable
Grain size [mm]	Sobek bath.	Sobek bath.	Sobek bath.	Sobek bath.	Sobek bath.	Sobek bath.
n. of classes	6	6	6	6	6	7
D ₅₀ BR	3.19	3.19	3.19	3.19	Gruijters ⁶	Gruijters ⁷
D ₅₀ WA	1.88	1.88	1.88	1.88	Gruijters ⁶	Gruijters ⁷
D ₅₀ PK	4.71	4.71	4.71	4.71	Gruijters ⁶	Gruijters ⁷
Helical flow						
ESPIR	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0
ASHLD	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
BSHLD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
CSHLD	0	0	0	0	0	0
DSHLD	0	0	0	0	0	0
Transverse bed slope						
ALPHABD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transport fomula	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2	MEYER- PETER- MULLER ME2
ACAL	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B (power)						
CC (power)						
RMU/M1 (ripple facor/efficiency)	variable	variable	variable	variable	variable	variable
THCR/M2	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
N (only if IFORM=2)	3	3	3	3	3	3
DEFORAC (thickness transport layer)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Stability						
ALFSTA						
NSTAB						
BB						
CRNMAX						
Time management						
Total Executions						
Roughness update interval	30 days	15 days	15 days	15 days	15 days	15 days
Number EXECUTIONS flow/Stop Parameter	1	1	1	1	1	1
Quantity name						
Rel. stop time for FLOW module	40	40	40	40	40	40
Number EXECUTIONS transport+botto	4	4	4	4	4	4
Rel. stop time for BOTTOM module	80	80	80	80	80	80
horizontal heddy viscosity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
horizontal heddy diffusivity (m2/s)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

B.4 Results

B.4.1 Introduction

The results have been presented in more than 30 pages of graphs, which figured in Bernabè's (2002) original report, submitted to Rijkswaterstaat RIZA by letter ZWS3333/Q3178/mh on November 1, 2002. Two types of graphs were given for each of the three river branches separately:

- Graph of 2-D morphology in two lines at the right and left river banks with respect to the bed levels in the river axis;
- Graph of width-averaged 1-D erosion and sedimentation of the river bed.

In the present report, however, these results are only summarized in text format. In general, the bed levels were obtained after a simulation time between 20 and 200 years, for which it could be concluded that the conditions represented an equilibrium state.

B.4.2 Case 1: Uniform sediment and constant roughness

The computations for Case 1 show a modelling problem: the line number 14 of the grid ends at the bifurcation point causing stagnation. This induces oscillations in the bed levels that are stable in time and can be characterized by consecutive high and low bed levels. This behaviour can also be noticed in the width-averaged bed levels. Various test computations with different parameters for the numerical stability have not led to a promising result so far². Thus, an elaborate calibration of the bed levels by an appropriate selection of the two-dimensional modelling parameters was not possible because the oscillations affect the morphological development in the whole model area. However, it can be concluded that, based on the uniform sediment approach, the Pannerdensch Kanaal tends to experience strong sedimentation. Fine material settles behind the bifurcation due to smaller flow velocities. The sedimentation causes a "dam effect".

Effect of median grain size:

The median grain size has been changed from the grain sizes of the SOBEK model to a homogeneous grain size of 2 mm in all river reaches. This only has a noticeable effect in the Bovenrijn and the Pannerdensch Kanaal. Smaller median grain sizes increase the bed slope in cross-sectional direction.

B.4.3 Case 2: Graded sediment approach with spatially homogeneous sediment properties and constant roughness

The computations show that also the sediment transport formula of type ME1 produces considerable oscillations in the bed levels at the bifurcation.

² More recently, Flokstra has found that this is a purely numerical problem. He has developed a new numerical scheme (research version) which does not produce these numerical bed level oscillations.

The height of the resulting bed waves increases the height in Case 1 by a factor of 2 to 3. Contrarily, computations with ME2 yielded smooth bed levels with no oscillations. They could be used for calibration of the model by changing the modelling parameters as described before.

B.4.3.1 Effect of the 2-D parameters on river bed morphology

Effect of ESPIR:

An effect of ESPIR is only noticeable in the 2-D morphology. A good fit with the initial bed levels was derived with $ESPIR = 1$. However, the bifurcation point and the outflow of the Waal still show strong deviations. The width-averaged bed levels are well represented only in the Bovenrijn and the Pannerdensch Kanaal. The Waal shows unwanted erosion of about 0.5 m.

Effect of ASHLD:

The ASHLD parameter noticeably affects the 1-D erosion in the Waal. The erosion can be reduced by a higher ASHLD value, which, however, locally causes extreme deviations. Finally, $ASHLD = 1.0$ has been selected as the best fit, taking into consideration that erosion still occurs in the Waal. The 2-D morphology is well represented apart from at the locations mentioned before.

Effect of CSHLD and DSHLD:

The assignment of non-zero values to these two calibration exponents does not improve the results. The 2-D morphology shows extreme bed slopes in all river reaches. The use of $CSHLD = 0.3$ also extremely affects the 1-D behaviour by causing strong sedimentation in the Pannerdensch Kanaal and strong erosion in the Waal.

Based on the results, it is suggested to use the following parameters for the calibrated model for Case 2:

- $ESPIR = 1.0$;
- $ASHLD = 1.4$;
- $BSHLD = 0.5$;
- $CSHLD = DSHLD = 0$.

B.4.3.2 Effect of the sediment transport properties on river bed morphology

Effect of median grain size:

Not analyzed yet.

Effect of the thickness of the transport layer:

In a test computation, the thickness of the transport layer, that had been 0.2 m in all previous cases, was set to 50 m. By this, all layers of the river bed are combined into one layer in which the median grain size remains constant. It turned out that this approach does not lead to promising results and should be rejected. The increased transport layer yields width-averaged bed levels with the same tendency as the uniform sediment approach. The 2D-morphology contains a lot of extreme and oscillating deviations. The figures show the good quality of the Case 2 results.

B.4.3.3 Effect of initial bed levels on equilibrium bed levels

The initial bed levels of Gruijters et al (2001) lie below the bed levels of the previously used bathymetry from the years 1988-1991. The general erosion of the project area is consequently proven by the measurements. For the morphological model, the inflow boundary condition remains unchanged, as the recent measurements by Gruijters et al are only available downstream of river kilometer 865.

The bed levels in equilibrium show for both initial conditions the same qualitative result. Referred to the initial bed levels, the cumulative erosion and sedimentation is similar but the differences in the initial bed levels also affect the downstream reaches in the Waal and the Pannerdensche Kanaal.

B.4.4 Case 3: Graded sediment approach with spatial distribution of sediment properties and constant roughness

Also the computations of Case 3 show considerable oscillations in the bed levels at the bifurcation. Only some preliminary results are presented here until a better numerical scheme perhaps leads to better results.

Effect of initial grain size frequencies on the bed morphology

Although oscillations occur, the effect of the grain size frequencies on the 2-D morphology can be analyzed for the Waal, i.e. downstream of the bifurcation. The spatially varying grain sizes produce greater bed slopes in cross-sectional direction. Oscillations occur also in the Pannerdensche Kanaal. The 1-D behaviour is equally well represented in the two computations made. The two computations differ only in the selection of the initial grain size frequencies and the spatial variation. All helical flow parameters, the initial bed levels and the sediment transport properties (formula, number of layers, thickness of transport layer) are the same.

B.4.5 Case 4: Alluvial roughness predictor approach with spatially homogeneous sediment properties

The computations for Case 4 show a similar behaviour as Case 1 in the 1-D analysis. The uniform sediment approach employed in both cases explains why Cases 1 and 4 are similar. Modelling problem: the line number 14 of the grid ends at the bifurcation point and causes stagnation.

This induces oscillations in the bed levels that are stable in time and can be characterized by consecutive high and low bed levels. The 2-D analysis on the other hand shows a worsening in the reproduction of the cross-sectional slopes of the river bed. The crossings in the equilibrium situation are found at other locations than the measured ones. Numerous tests have been made, in which individual calibration parameters have been changed in order to improve the results. All simulations carried out have evidenced the same problem. It can therefore be concluded that it has not been possible to reach a good reproduction of the equilibrium condition.

B.4.6 Case 5: Graded sediment approach with homogeneous and spatially distributed sediment properties and alluvial roughness predictor

This approach yielded the best results. They are comparable with those of Case 2. The computations executed previously use constant grain size distributions in the three river branches (like Case 2). It is interesting to observe that the 2-D adaptation is better in Case 5 than in Case 2, particularly in the upstream Bovenrijn.

B.5 Conclusions

The primary objective of the study carried out was to investigate which level of detail is necessary to describe in a satisfactory way the morphology of a river system characterized by a bifurcation. Attention has been drawn to the one-dimensional (width-averaged) and two-dimensional evolution of the river bed.

The river bed topography was obtained from averaged measurements carried out within approximately 10 years. The hypothesis has been made that the database represents the situation of river morphology in equilibrium state. This is a simplification, because it neglects the effects of temporal discharge variability and anthropogenic activities such as dredging (which can even alter the dynamic equilibrium). In accordance with this hypothesis, the executed computations have been carried out for a sufficiently long time, in order to reach the equilibrium. The resulting bed topography has been compared with the measured bed topography (which is not necessarily in equilibrium).

The starting point of the study was the use of the standard version of Delft3D that allows only one granulometric grain size fraction. In Case 1, it turned out that the results do not allow to represent in a satisfactory way the temporal evolution of the bed levels. In fact, excessive sedimentation occurs in the Pannerdensch Kanaal due to the fact that the model does not distinguish between fine and coarse material.

Subsequently, an approach with graded sediment that allows different granulometric classes and their respective frequencies of occurrence in the bed has been used in Case 2. The distribution of the frequencies in the three different river branches was varied. The selection of the percentage of each class has been obtained from the output of the Sobek model in the initial computations. The results improve the reproduction of the morphological characteristics of the river. In particular, the distribution of sediments and their sorting in the two channels downstream of the bifurcation appears more realistic.

Case 3 introduces also the spatial variability of the granulometric classes, based on a measurement campaign by Gruijters et al (2001). The composition of the bed material changes from point to point giving a more realistic situation. However, the results are not particularly good, because they are affected by numerical fluctuations in the bed topography and in the sediment distribution. The origin of the fluctuations still has to be investigated in order to reveal the cause of this phenomenon.

In Case 4, the reproduction of the two-dimensional behaviour of the river bed is worse. Using the alluvial roughness predictor without accounting for spatial variations in sediment properties does not allow to correctly localize the position of the crossings, i.e. the points where the riverbed changes its transverse slope from one direction to the opposite direction. Also the 1-D analysis is not satisfactory, because it uses the schematization with non-graded sediment, so that the Pannerdensch Kanaal tends to experience strong sedimentation.

Finally, Case 5 produces the best results. From this we may conclude that graded sediment transport and an alluvial roughness predictor are necessary for the morphological modelling of the Pannerdensch Kop. It remains necessary to investigate the case in which graded sediment transport plus alluvial roughness are combined with a spatial distribution of sediments (to be compared with Case 3).

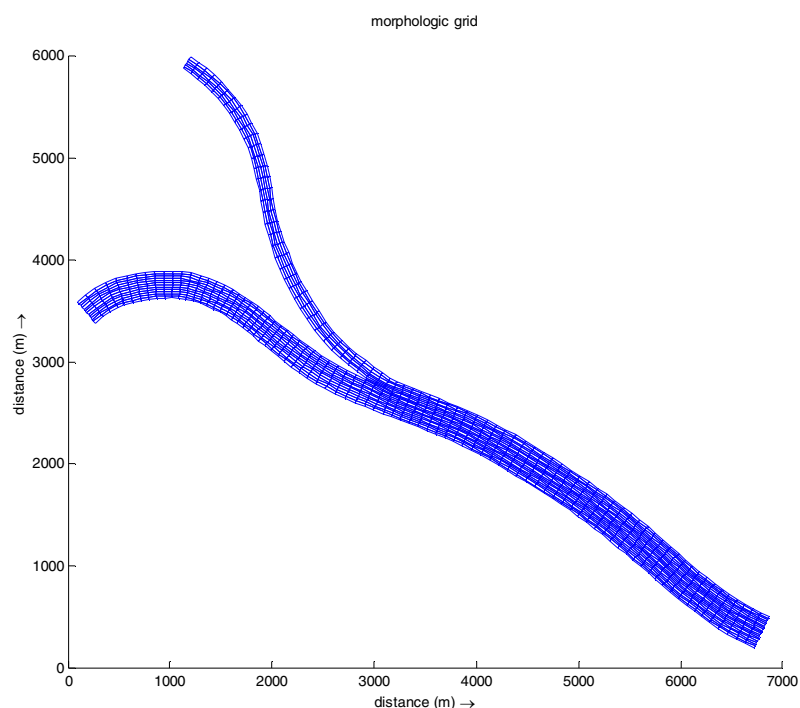
The following remarks can be given for future work:

1. There is a difference in the two data sets of the bed levels. The measurements of Gruijters et al (2001) show a profile more similar to that obtained from modelling. However, this data set is less smoothed than the data from measurements averaged over 10 years;
2. Dredging was carried out at the northern bank of the Waal at the downstream part of the river reach where measurements were taken. It took place shortly before the measurement campaign. However, no material was dumped back to the river at the southern bank. So the measurements at the southern bank of the Waal are without any effect of human impact. The computational results show a different distribution of D_{50} here.
3. In earlier studies by Struiksma also problems at the stagnation point occurred. The bed load transport showed fluctuations with time at the grid cell close to the bifurcation. Also a study by Van den Brink showed the same behaviour, even when using 2-D weirs at this location.

C Tussenrapportage Verhaar (2003)

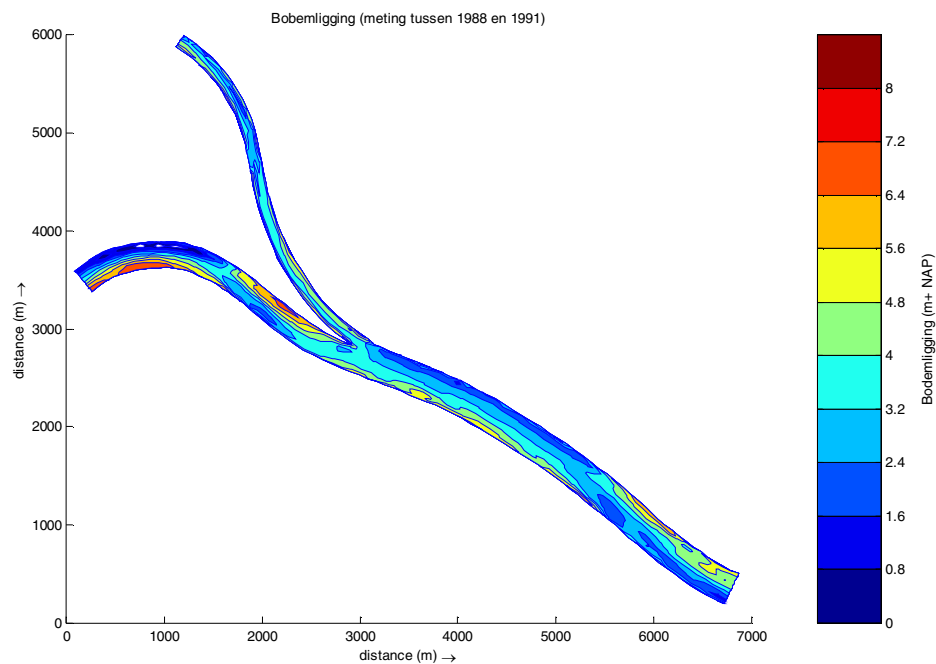
C.1 Beschrijving model Pannerdensch Kop

Het modelgebied omvat het splitsingspunt van de Bovenrijn in de Waal en het Pannerdensch Kanaal en wordt gerepresenteerd door een rekenrooster zoals weergegeven in Figuur C.1. Het rekenrooster bestaat uit 85 bij 21 roostercellen met een grootte van ongeveer 100 bij 20 meter elk. De bovenstroomse rand is gesitueerd op Rkm 862,8. De benedenstroomse randen zijn gesitueerd op Rkm 870,6 en Rkm 871,2 voor respectievelijk de Waal en het Pannerdensch Kanaal.

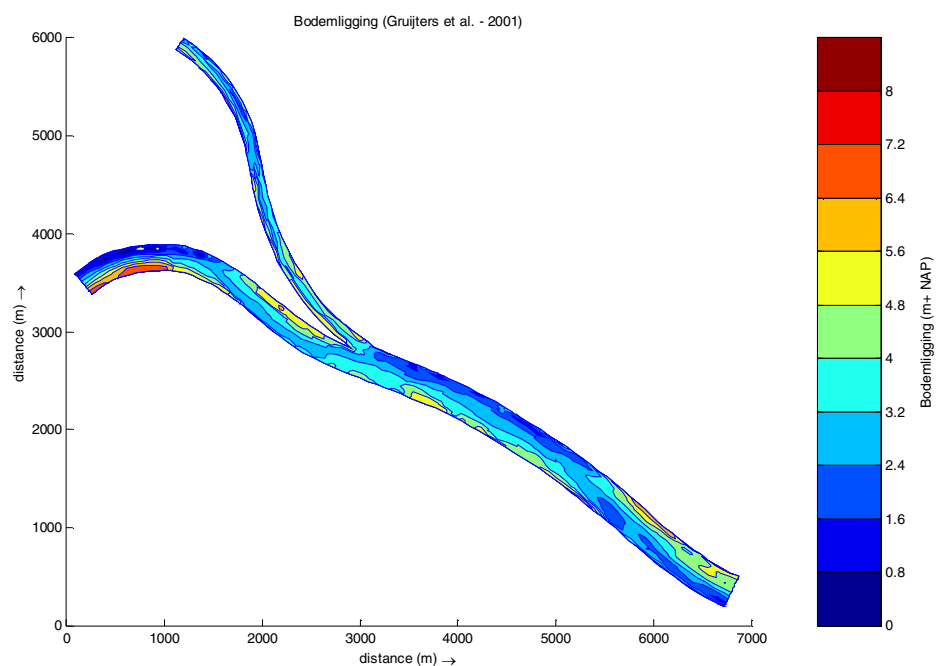


Figuur C.1: Numeriek rekenrooster van splitsingspunt Pannerdensch Kop.

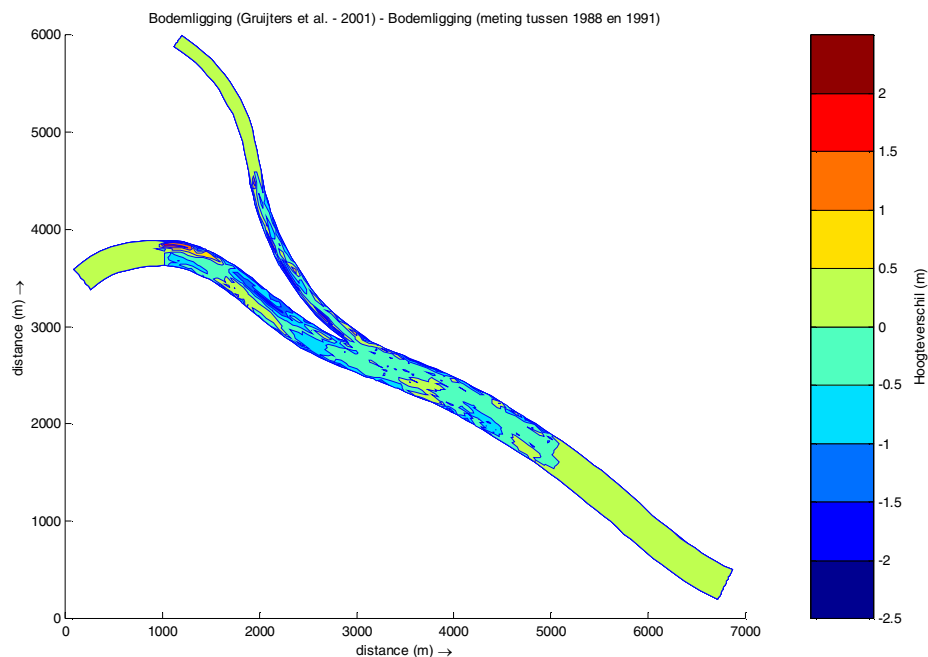
Voor de initiële bodemligging worden twee datasets gebruikt. De eerste is een gemiddelde bodemligging gemeten tussen 1988 en 1991. De tweede is verkregen door metingen van Gruijters et al (2001), maar beslaat niet het gehele modelgebied. De metingen zijn verricht tussen Rkm 865,0 op de Bovenrijn en Rkm 869,5 op de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Voor de overige delen van het modelgebied wordt de bodemligging gelijk gesteld aan de eerste dataset. De twee datasets zijn weergegeven in respectievelijk de Figuren C.2 en C.3. Het verschil tussen beide datasets is in Figuur C.4 weergegeven. Van de bodemligging volgens Gruijters et al is de meerjarige meting afgetrokken, zodat een negatieve waarde een bodemdaling tussen 1990 en 2001 inhoudt.



Figuur C.2: Gemiddelde bodemligging volgens metingen tussen 1988 en 1991.

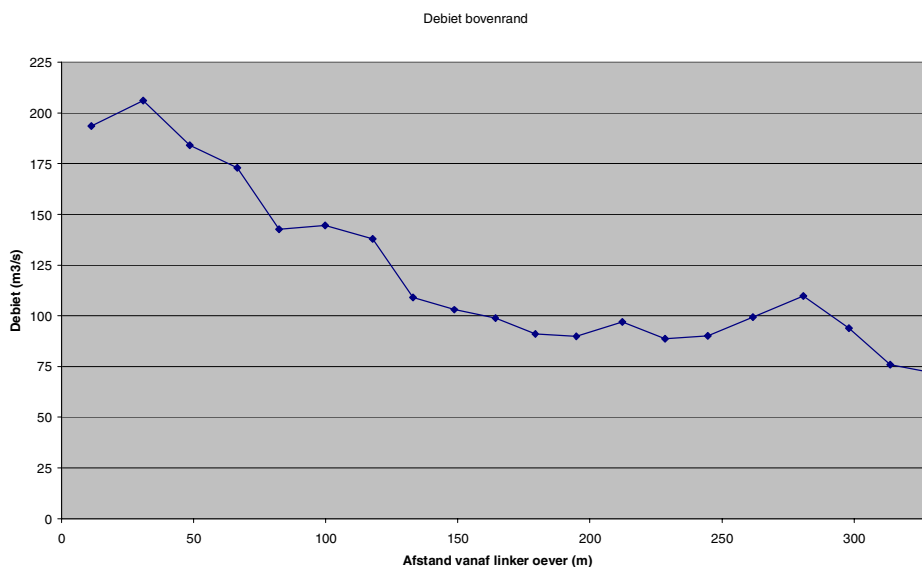


Figuur C.3: Bodemligging volgens Gruijters et al (2001).



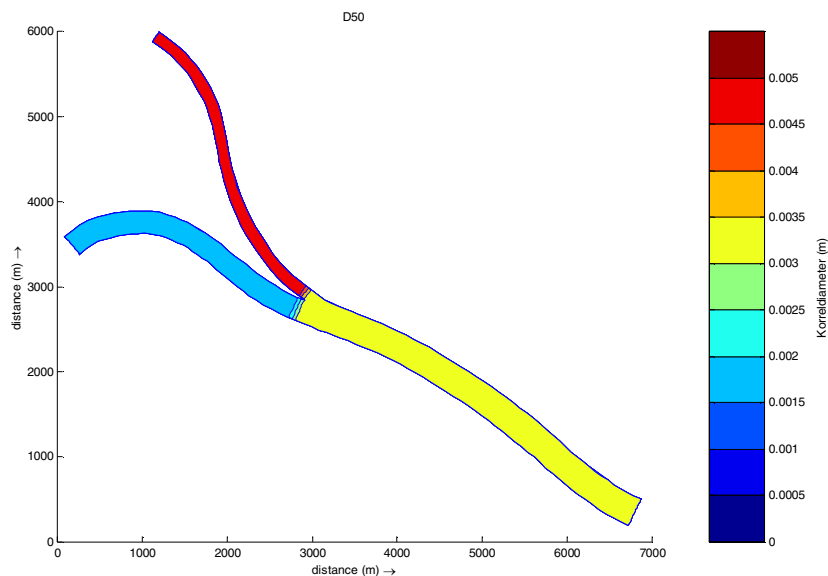
Figuur C.4: Verschil in bodemligging tussen Gruijters et al (2001) en het gemiddelde tussen 1988 en 1991.

De bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde is gedefinieerd als een constant debiet van $2400 \text{ m}^3/\text{s}$, met een verdeling in dwarsrichting gebaseerd op de Chézy-evenwichtsdiepte: $q \sim h^{3/2}$ (zie Figuur C.5). De benedenstroomse hydraulische randvoorwaarde is gedefinieerd als vaste waterstanden voor de Waal en het Pannerdensch Kanaal van respectievelijk $9,57 \text{ m} + \text{NAP}$ en $9,54 \text{ m} + \text{NAP}$.

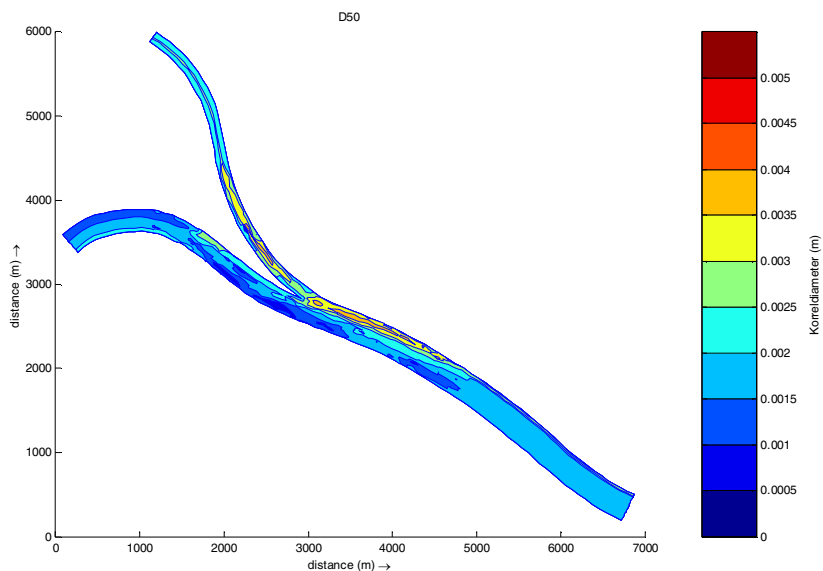


Figuur C.5: Bovenstroomse hydraulische randvoorwaarde.

De initiële bodemsamenstelling heeft net als de bodemligging twee datasets voorhanden, te weten: één waarbij een ruimtelijk uniforme korreldiameterverdeling per tak wordt aangehouden op basis van berekeningen met het Sobek Rijtakkenmodel en één op basis van metingen uitgevoerd door Gruijters et al (2001), zie Figuren C.6 en C.7.



Figuur C.6: Ruimtelijke verdeling van de korreldiameter volgens Sobek Rijtakkenmodel.



Figuur C.7: Ruimtelijke verdeling van de korreldiameter volgens Gruijters et al (2001).

C.2 Beschrijving werk Bernabè

Het door Bernabè uitgevoerde onderzoek is gedaan met het model dat beschreven is in de voorgaande paragraaf. Er worden vijf verschillende cases onderscheiden, zie Tabel C.1. Elke case bestaat uit meerdere simulaties om zo een gevoeligheidsanalyse uit te kunnen voeren. In Tabel C.2 is een overzicht te vinden van de gevarieerde parameters en de daarbij behorende simulatiecodes zoals die door Bernabè zijn uitgevoerd.

Tabel C.1: Overzicht van vijf onderscheiden cases.

Case	Sedimenttype	Ruwheid	Beginconditie korreldiameter
1	uniform	constant	uniform (per tak)
2	gegradeerd	constant	uniform (per tak)
3	gegradeerd	constant	Gruijters et al (2001)
4	uniform	alluviaal	uniform (per tak)
5	gegradeerd	alluviaal	Gruijters et al (2001)

Door Bernabè is een analyse uitgevoerd op basis van de bodemligging. Zijn belangrijkste bevindingen zijn:

- In Case 2 (gegradeerd sediment, constante ruwheid) en Case 4 (uniform sediment, alluviale ruwheid) lijkt het onmogelijk om een goede kalibratie van de bodemligging te verkrijgen. Het feit dat beide cases zoveel slechter presteren dan Case 1 (uniform sediment, constante ruwheid) bevestigt de hypothese dat ruimtelijke variaties in bodemruwheid de variaties in bodemsamenstelling compenseren. De vraag blijft of dit een universeel verschijnsel is of dat het een toevallige uitkomst is voor de Nederlandse Rijntakken (de Pannerdensch Kop in het bijzonder).
- Case 3 met een gemeten initiële korreldiameterverdeling geeft betere resultaten dan Cases 1 en 2 met uniforme initiële korreldiameterverdeling. De initiële korreldiameterverdeling is blijkbaar van grote invloed op de berekende bodemligging.
- Case 5 gaf de beste resultaten. Dit is een sterke aanwijzing dat het transport van gegradeerd sediment en een alluviale ruwheidvoorspeller nodig zijn voor het morfologisch modelleren van de Pannerdensch Kop.

C.3 Eigen simulaties

In aanvulling op de simulaties van Bernabè zijn extra simulaties uitgevoerd om een beter beeld te krijgen van hoe het model zich gedraagt. In Tabel C-3 is een overzicht gegeven van de uitgevoerde simulaties. Bij elke simulatie is aangegeven welke parameter is aangepast en welk doel de aanpassing dient. De simulaties zijn uitgevoerd in Case 2 volgens de indeling van Bernabè tenzij anders aangegeven.

WL | Delft Hydraulics

[illegible]

Tabel C.3: Overzicht eigen simulaties.

Eigen simulaties	Doel van de simulatie
110B03	Verhoging debiet met 10% om grove fracties in beweging te krijgen
115B03	Verhoging debiet met 10% om grove fracties in beweging te krijgen
B03_RVW	Sedimenttransport op bovenrand uniform over de breedte in plaats van evenwichtstransport om invloed van de morfologische randvoorwaarde te bepalen
B03_ACAL	Verhogen van A_{cal} om invloed op bodemontwikkeling te bekijken
B03_SPIR	Uitzetten van spiraalstroming om aandeel in richtingsformule te bepalen
B03_Ashld	Grote waarde voor A_{shld} om aandeel in richtingsformule te bepalen
B03r	Richtingsformule buitenspel zetten door spiraalstroming uit te schakelen en grote waarde voor A_{shld} te gebruiken
B03_1D	Initiële bodemligging horizontaal in de breedte om effect van richtingsformule op de axiaalsymmetrie te bekijken
B03r_1D	Initiële bodemligging horizontaal in de breedte en richtingsformule buitenspel om effect van richtingsformule op de axiaalsymmetrie te bekijken
B03_transportlaag_klein	Transportlaag verkleinen om effect op aanpassingsnelheid van de bodem te zien
B03_transportlaag_groot	Transportlaag vergroten om effect op aanpassingsnelheid van de bodem te zien
B03_Ashld_small	Kleine waarde voor A_{shld} om hellingseffect in de richtingsformule te vergroten
<i>B03_cor</i>	Simulatie met zelfde instelling als B03, maar berekend met Delft3D-versie van Cor Flokstra voor gegradeerd sediment
<i>B03s</i>	Simulatie met zelfde instelling als B03_RVW, maar berekend met Delft3D-versie van Cor Flokstra voor gegradeerd sediment
<i>B03zi</i>	Simulatie met zelfde instelling als B03r, maar berekend met Delft3D-versie van Cor Flokstra voor gegradeerd sediment
B16 Gruijters_1D Case 3	Initiële sedimentverdeling volgens Gruijters et al (2001) breedtegemiddeld invoeren om het effect van laterale variatie van korreldiameter te bekijken
B411 Case 4	Initiële sedimentverdeling volgens Gruijters et al (2001) breedtegemiddeld invoeren om het effect van laterale variatie van korreldiameter te bekijken

C.4 Analyse

Voor de analyse van de simulaties zijn lineaire analyses toegepast op bodemligging en bodemsamenstelling. Verder worden de debietverhouding en de sedimentverdeling tussen de takken met elkaar vergeleken. Voor het overzicht worden de verschillende cases los behandeld. Verschillende simulaties worden dan ook alleen vergeleken met simulaties uit dezelfde case. Tabel C.4 geeft een overzicht van alle simulaties, hun instellingen en globale gedrag.

C.4.1 Aanpassingen B13, om oscillaties te verminderen

- Dunne dam (optie “*thindam*”) voor het splitsingspunt op $n=14$ met lengtes van 1 cel en 2 cellen. Oscillatie blijft, schuift op met de *thindam* mee.
- Zand op het splitsingspunt. Een extra roosterpunt gemaakt met hoge bodem, zodat er een soort scherpe splitsing ontstaat. Ook nu blijven oscillaties optreden.
- Grid lokaal verfijnd, roostercellen gehalveerd, oscillaties blijven. Meer oscillaties door meer roostercellen.

C.4.2 Mediane korrelgrootte

De initiële longitudinale korreldiameterverdeling is in sterke mate van invloed op de D_{50} -verdeling aan het einde van de berekening, al liggen de resultaten van Sobek en Gruijters et al dicht bij elkaar in Bovenrijn en Waal.

De bodemsamenstelling aan het einde van de berekening vertoont grotere variaties in D_{50} dan de metingen van Gruijters et al. Bij Gruijters et al zijn de verschillen maximaal 2 mm, terwijl bij de berekeningen verschillen van 4 tot 7 mm te zien zijn.

Voor Case 2 neemt de waarde van de D_{50} toe in de Bovenrijn en Waal en af in het Pannerdensch Kanaal (ten opzichte van de Sobek-distributie). De afname in het Pannerdensch Kanaal is in overeenstemming met de metingen van Gruijters et al. De verdeling van de D_{50} in dwarsrichting is in de Bovenrijn en Waal in grote lijnen hetzelfde voor de verschillende berekeningen. Wel zijn de verschillen in dwarsrichting erg groot, orde 2 tot 8 mm. In het Pannerdensch Kanaal is de verdeling sterk afhankelijk van de parameterinstellingen en bodemontwikkeling.

Voor Case 3 blijft de D_{50} in de buurt van de Gruijters-verdeling. Toch is ook hier te zien dat de D_{50} in Bovenrijn en Waal toeneemt. In het Pannerdensch Kanaal neemt de D_{50} toe nabij het splitsingspunt. In dwarsrichting is ook hier het verschil erg groot, orde 2 tot 8 mm. In alle takken wordt de verdeling sterk beïnvloed door de bodemligging en parameterinstellingen.

Voor Case 5 geldt dat ook hier de D_{50} in de Bovenrijn en Waal grover wordt dan de beginconditie. In het Pannerdensch Kanaal schommelt de D_{50} echter rond de beginwaarde van Sobek. Dat is niet het geval bij de Gruijters-beginconditie, waarvoor geldt dat ook de D_{50} in het Pannerdensch Kanaal grover wordt. Voor de dwarsrichting geldt hetzelfde als bij Case 2.

De D_{50} volgt over het algemeen wel het patroon wat je zou verwachten: grof in de buitenbocht, fijn in de binnenbocht.

C.4.3 Transport

Het sedimenttransport is een indicator of er eigenlijk wel iets gebeurt. Men kan kijken naar de waarde van het totale transport, de verdeling over de takken en naar de verhouding van fracties. De mate van transport is sterk afhankelijk van de parameterinstelling en de beginvoorwaarde. In het algemeen geldt dat de fracties 1 tot en met 4 overal in beweging zijn, dat fractie 5 niet beweegt in het Pannerdensch Kanaal en soms beweegt in de Waal en dat fractie 6 nergens in beweging is. De verhoudingen tussen de transporten van de verschillende fracties zijn voor de Bovenrijn en Waal bij de verschillende berekeningen redelijk constant. Op het Pannerdensch Kanaal is deze afhankelijk van of er bijvoorbeeld verzanding optreedt. Tabel C.5 geeft een overzicht.

Tabel C.4: Overzicht van de resultaten van de simulaties (BR = Bovenrijn, PK = Pannerdensch Kop).

Case 1	Bodemligging		Bodemsamenstelling (D ₅₀)		Sedimenttransport	
	Gemiddeld	Dwarshelling	Gemiddeld	Dwarsrichting	Totaal	Verdeling tussen de takken
S_{sed}/Q_{ik} [2.3] S_{sed}/S_{ek} (3 á 5)						
B01 (Uniform) [6.7] (4.1)	BR goede ligging Waal erosie ±2.0 m PK sedimentatie ±2.5 m PK te vlak	BR en Waal goed, crossings iets benedenstroms PK te vlak	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte klein ten opzichte van metingen.	Komt overeen met metingen
B02 (Sobek gran size) [15.8] (84.0)	BR goede ligging Waal erosie ±3.0 m PK sedimentatie ±3.5 m	BR en Waal goed, crossings iets benedenstroms PK te vlak	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte vergelijkbaar B01.	Heel weinig naar PK
B02 bis (alfa stab: 11 n stab: 6) [4.6] (5.0)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte vergelijkbaar B01.	Komt overeen met metingen
B02 ter (Gruijters grain size) [7.8] (11.6)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte vergelijkbaar B01.	Weinig naar PK
B13 (MPM formula) [181.9] (°)	BR redelijke ligging, oscillaties voor splitsing. Waal erosie ±4 m en PK drempel in mond totale afsluiting	BR verschil erg groot, Waal redelijk iets groter dan initiële conditie PK geen verandering door afsluiting	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte klein tov B01	Geen transport naar PK
B18 (alfa stab: 40 l n stab: 4) [35.4] (°)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte klein tov B01	Geen transport naar PK
B19 (alfa stab 30) [13.6] (°)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte klein tov B01	Geen transport naar PK
Case 2	Bodemligging		Bodemsamenstelling (D ₅₀)		Sedimenttransport	
	Gemiddeld	Dwarshelling	Gemiddeld	Dwarsrichting	Totaal	Verdeling tussen de takken
B03 (Basis) [2.1] (7.0)	Ligging in overeenstemming met meting, Waal nabij Pannerdensch Kop erosie ±0.5 m	Helling in overeenstemming met meting, benedenranden iets sterkere helling	BR en Waal worden grover en PK finer	Bochtprofiel herkenbaar diameter verschil groot tov metingen (Gruijters)	Transportgrootte klein ten opzichte van metingen en fractieverhouding goed	Meer sediment naar Waal dan in metingen
B03 bis (Gruijters bathymetry) [2.6] (5.0)	Gelijk ligging nabij bovenrand afwijking vanaf verschil Gruijters/meting 88-91, gelijke trend	Gelijk ligging nabij bovenrand afwijking vanaf verschil Gruijters/meting 88-91, gelijke trend	BR en Waal gelijke trend, PK nog finer	Minder asymmetrisch dan B03	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	In overeenstemming met metingen
B05 (Uniform grain size) [2.4] (3.0)				Oplossing dichtbij initiële conditie	Transportgrootte aan de hoge kant tov B03 en metingen, kleinst fracties evenveel transport	In overeenstemming met metingen
B06 (Espr: 1.5) [2.2] (5.6)	Gelijk aan B03	Gelijk aan B03	Gelijke trend B03 PK iets meer verfijning dan B03	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK groter dwarsverschil minder 'crossings'	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	In overeenstemming met metingen, meer naar PK dan B03
B07 (Espr: 0.8) [2.4] (8.4)	Gelijk aan B03	Gelijk aan B03	Gelijke trend B03 PK iets minder verfijning dan B03	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK kleiner dwarsverschil meer 'crossings'	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	Meer sediment naar Waal dan in metingen en B03
B08 (Ashld: 0.8) [2.2] (4.5)	Gelijke trend, meer erosie in Waal nabij Pannerdensch Kop ±0.7 m	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK afwijkingen op details	Gelijke trend, Waal iets grover en PK iets finer dan B03	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK meer 'crossings'	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	In overeenstemming met metingen, meer naar PK dan B03
B09 (Ashld: 2.8) [2.1] (14.0)	Gelijke trend, geen erosie in Waal	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK afwijkingen op details	Gelijke trend, Waal iets finer en PK iets grover dan B03	Gelijke trend B03 in BR en Waal, PK minder dwarsverschil	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	Meer sediment naar Waal dan in metingen en B03
B10 (n: 1) [2.2] (°)	Gelijk aan metingen	Gelijk aan metingen	BR schommelt rond initiële conditie, Waal gelijke trend B03, PK eerste deel verfijnd, laatste stuk geen verandering.	BR weinig verschil initiële conditie, PK geen verandering van bodemsamenstelling Waal. Zelfde vorm B03 kleiner dwarsverschil	Transportgrootte klein tov B03, fractieverhouding goed	Geen transport in PK
B11 (Drop below stop cretation) [2.2] (5.0)			Gelijke trend B03 PK iets finer	Gelijke trend B03 in PK groter dwarsverschil	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	In overeenstemming met metingen minder naar Waal dan B03
B12 (DEFORAC: 50) [5.2] (1.2)	BR halverwege sedimentatie en erosie ±0.8 m Waal erosie van ±2.0 m PK begin sedimentatie ±2.5 m	Erg grote verschillen, bochtprofiel in BR Waal herkenbaar PK begin rare vormen.	Nagenoeg geen verandering tov initiële conditie	Nagenoeg geen dwarsverschil	Transportgrootte klein tov B03 en onregelmatig langs rivier, fractieverhouding goed	Geen transport in beneden stroomdeel PK
B14 (Cahld: 0.3) [4.7] (0.7)	BR near erosie naar Pannerdensch Kop Waal erosie ±2.0 m PK sedimentatie ±1.7 m	Geen bochtprofiel te herkennen	BR dichtbij initiële conditie, Waal grover en PK veel finer dan B03	Rommelig verloop	Transportgrootte en fractieverhouding goed	Meer transport in PK dan in de Waal
B15 (Dahld: 0.5) [2.1] (1.5)	Gelijke trend, wat onrustiger verloop	Grotere hellingen en meer najlen van de bochten	Gelijke trend, Waal iets grover benedenstroms, PK iets finer benedenstroms	Gelijke trend B03 dwarsverschil groter	Transportgrootte vergelijkbaar B03 en fractieverhouding goed	Verhouding te klein ten opzichte van metingen

Case 3	Bodemligging	Dwarsshelling	Bodemsamenstelling (D ₅₀)	Dwarsrichting	Sedimenttransport	Verdeling tussen de takken
	Gemiddeld		Gemiddeld		Totaal	
B16 (Basis) [3.0] (2.8)	Gelijke trend met B03; Ligging in overeenstemming met meling, Waal nabij Pannerdsche Kop erosie ±0.5 m PK sedimentatie ±0.4 m	Gelijke trend, meer oscillaties dan B03 zeker in PK, Waal stellere helling	Oplossing dichtbij initiële conditie overal iets grover geworden	Verloop niet in overeenstemming met bochten, groot verschil tov initiele conditie	Transportgrootte goed tov melingen, verhouding van de fracties slecht, kleine vracte veel transport grootte fracties zelfde orde grootte	Transport naar PK aan de hoge kant.
B16.bs (ME1) [2.4] (-)						Geen transport in PK
B17 (Grujters bathymetry) [2.7] (2.9)			Gelijke trend B16 Kleine lokale verschillen	Gelijke trend B16	Gelijk aan B16	In overeen stemming met metingen
B20 (7 fracties) [2.1] (11.5)			Gelijke trend B16 overal iets grover	Meer in vereenstemming met bochten.	Transportgrootte klein bv B16, fractie verhouding gelijk B16	Nagenoeg geen transport in PK
B21 (=B20)						
Case 4	Bodemligging	Dwarsshelling	Bodemsamenstelling (D ₅₀)	Dwarsrichting	Sedimenttransport	Verdeling tussen de takken
	Gemiddeld		Gemiddeld		Totaal	
B401 (Basis) [13.1] (11.8)	BR gelijke trend initiële conditie. Waal erosie ±3.3 m PK verzand sedimentatie ±3 m	BR kleiner dan initiële conditie. Waal crossings meer benedenstrooms PK chaotisch	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B402 (MPM) [7.9] (15.3)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte klein bv meling	Nagenoeg geen transport in PK
B403 (Acac: 2.7) [6.8] (10.0)	Br gelijke trend initiële conditie. Waal erosie ±3 m PK verzand sedimentatie ±2.5 m	BR kleiner dan initiële conditie. Waal crossings meer benedenstrooms PK chaotisch	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte in overeenstemming met metingen	Nagenoeg geen transport in PK
B404 (Espir: 1.5) [13.1] (499)	Gelijke trend B401	Gelijke trend B401	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B405 (Espir: 0.8) [14.2] (149)	Gelijke trend B401	Gelijke trend B401	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B406 (Ashid: 0.8) [15.1] (509)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B407 (Ashid: 2.8) [8.8] (356)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B408 () [10.2] (205)			N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B409 (D90 specified) [18.5] (449)	Gelijke trend B401	Gelijke trend B401	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte erg groot tov meling	Nagenoeg geen transport in PK
B410 (Van Rijn Formula) [13.7] (74)	Gelijk trend B401 Waal minder erosie ±2 m PK verzand over gehele lengte	Gelijke trend B401	N.v.t.	N.v.t.	Transportgrootte erg groot tov meling	Klein transport in PK
Case 5	Bodemligging	Dwarsshelling	Bodemsamenstelling (D ₅₀)	Dwarsrichting	Sedimenttransport	Verdeling tussen de takken
	Gemiddeld		Gemiddeld		Totaal	
B501 (Basis) [1.8] (4.6)	Goede ligging sedimentatie voor Pannerdensche Kop ±0.5 m Waal erosie ±0.4 m PK gelijk meling	Nagenoeg gelijk aan meling.	BR en Waal worden grover, onregelmatig verloop. In PK schommelt rond begin waarde	Rommelig verloop geen bocht profiel herkenbaar	Transportgrootte klein bv melingen, onregelmatig verloop	Verhouding goed
B502 (Roughness interval: 15 dgn) [1.8] (8.1)	Goede ligging BR en PK gelijk meling Waal erosie ±0.4 m	Nagenoeg gelijk aan meling.	BR en Waal worden grover, meer gelijkmatiger. PK schommelt rond begin waarde	Gelijken's met B03, crossings wat later diameter verschil ongeveer gelijk	Transportgrootte klein bv melingen. Zelfde orde B501	Weinig transport naar PK
B503 (=B03) [2.2] (7.6)			Gelijke uitkomst B03: BR en Waal worden grover en PK fijner	Bochtprofiel herkenbaar diameter verschil groot tov metingen (Grujters)	Transportgrootte klein bv melingen. Zelfde als B03	Meer sediment naar Waal
B504 (Espir: 2) [1.7] (11.1)			Gelijke trend B502	Gelijke trend B502 crossing iets eerder en diameter verschil grooler dan B502	Transportgrootte klein bv melingen. Zelfde orde B501	Meer sediment naar Waal
B505 (Grujters grain size) [1.7] (-)						
B506 (7 fracties / Grujters grain size) [1.7] (-)			Gelijke trend kleine verschillen	Onregelmatiger verloop. PK groter verschil in diameter	Transportgrootte klein bv melingen. Zelfde orde B501	in PK geen transport

Eigen simulaties	Bodemligging		Bodemamenstelling (D ₅₀)		Sedimenttransport	
	Gemiddeld	Dwarshelling	Gemiddeld	Dwarshelling	Totaal fractie verhouding	Verdeling tussen de takken
110B03 (Q: 2640 m³/s) (2.5) (4.2)	BR redelijk Waal erosie ±0.5 m, zelfde trend PK sedimentatie ±0.3 zelfde trend	BR en Waal zelfde trend ongelijkmatiger PK slecht	Gelijke trend, lokaal wat verschillen	Gelijke trend, toch grote verschillen	Neemt toe, grove fracties in verhouding meer	Meer transport PK
	115B03 (Q: 2720 m³/s) (2.8) (8.4)	BR matig Waal erosie ±1.5 m PK sedimentatie ±1 m zelfde trend bovenrand sedimentatie ±0.5 m	Totaal verschillend van B03 en initiele helling Gelijke oplossing	BR en PK gelijke trend, Waal fijner	Zeet verschillend	Minder transport in PK
B03_RWW uniform transport op bovenrand (2.3) (1.3)	'Exact' gelijk	'Exact' gelijk	Gelijke trend, PK iets meer verfijning	Gelijke trend PK wat grotere afwijkingen	Neemt sterk toe tov B03, onderlinge verhouding blijft gelijk	Blijft gelijk
	B03_ACAL Acal: 33.6 (2.2) (6.9)	Zelfde ligging	Gelijke trend, PK iets grotere afwijking	Gelijke trend	Blijft gelijk aan B03	Iets minder naar PK
B03_ASHID Ashid: 10° Bshid: 0 (2.1) (23.8)	Zelfde ligging, beneden Waal sedimentatie	Zelfde trend	Gelijke trend	Gelijke trend	Zelfde orde grootte als B03 (iets minder), kan met magnitude te maken hebben	Veel minder naar PK
	B03r Espir: 0; Ashid: 10° (2.1) (15.9)	Zelfde ligging	Gelijke trend	Gelijke trend, Waal grote verschillen	Zelfde orde grootte als B03 (iets minder), kan met magnitude te maken hebben	Veel minder naar PK
B03_1D Beginbodem 1D (2.6) (3.3)	Bodem gelijke trend initiele ligging aanzanding in het midden van BR	Redelijk horizontaal	Gelijke trend, meer verfijning in PK Meer downstreammining in Waal	Geen bochtprofiel te herkennen.	Kleine afname tov B03	Meer naar PK
B03r_1D Beginbodem 1D Espir: 0; Ashid: 10° (2.2) (10.8)	Bodem redelijk in BR grote aanzanding in het midden	Horizontaal in PK en BR en Waal onregelmatig verloop dwarshelling	Overal grover	Geen bochtprofiel te herkennen	Veel kleiner dan B03	Minder naar PK
B03_transportlaag_klein DEFORAC: 0.1 (2.1) (6.2)	Gelijke trend, in BR lokaal meer erosie ±0.2 m Waal minder erosie, PK iets erosie	Gelijke trend	Gelijke trend in PK iets grover	Gelijke trend	Blijft gelijk onderlinge verhouding ook	Meer naar PK
B03_transportlaag_groot DEFORAC: 0.5 (3.0) (7.9)	BR gelijke ligging, Waal meer erosie ±0.5 m gelijke trend, PK sedimentatie ±0.2 m gelijk trend	Gelijke trend	Gelijke trend in Waal en PK iets fijner	Gelijke trend	Blijft gelijk onderlinge verhouding ook	Iets minder naar PK
B03_Ashid_small Ashid: 0.1 (2.2) (2.0)	BR gelijke trend, erosie in Waal ± 1 m PK sedimentatie ±0.5 m	Gelijke trend in BR, in Waal iets vlakker, PK volledig horizontaal	BR verfijning richting splitsingspunt, Waal iets grover PK veel fijner	In Waal iets van bochtprofiel waanreembaar.	Iets hoger dan B03, kan door magnitude komen, orderlinge verhouding gelijk	Meer naar PK
B16_Gruifers_1D Bodemamenstelling breedte gemiddeld (2.4) (2.6)	Gelijke ligging B16	Gelijke ligging B16	Gelijke lagging B16	Gelijke ligging B16	Gelijk aan B16	Gelijk aan B16
B411 Bodemamenstelling breedte gemiddeld (2.1) (0)						
B03_cor (2.1) (7.0)	Gladde oplossing, goede ligging	Gladde oplossing, goede ligging	Vergraving BR en Waal, PK blijft grof	Lijkt nergens naar bochtprofiel niet terug te vinden	Zowel grootte als verhouding goed resultaat.	Verdeling wat veel naar Waal
B03s uniform transport op bovenrand (2.3) (1.5)	Gelijke ligging, alleen sedimentatie nabij bovenrand ±0.5 m	Nagenoeg gelijk aan B03_cor	BR Vergraving bovenrand verfijning nabij Pannerdenschep Kop, Waal en PK gelijke trend, Waal meer vergraving, PK meer verfijning dan B03_cor	Waal en PK nagenoeg gelijk aan B03_cor, BR komt bovenrand niet overeen met B03_cor	Grootte en fractie verhouding oké	Meer sediment naar PK
B03zi richtingsformule uit (2.2) (20.0)	Ligging gelijk aan B03_cor	Nagenoeg gelijk aan B03_cor	Iets minder vergraving Waal, rest gelijk B03_cor	Totaal anders dan B03_cor, geen bochtprofiel terug te vinden	Grootte en fractie verhouding oké	Erg veel naar Waal

Tabel C.5: Overzicht van fracties die in beweging zijn (X = geen beweging, -- = niet in berekening, 0 = geen uitvoer).

	Fraction 1			Fraction 2			Fraction 3			Fraction 4			Fraction 5			Fraction 6			Fraction 7		
	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk	BR	Wa	Pk
Case 2																					
B03	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B03_bis	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	--	--	--
B05	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--
B06	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B07	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B08	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B09	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B10	.	.	X	.	.	X	.	.	X	.	.	X	X	X	X	X	X	X	--	--	--
B11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B15	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--
Case 3																					
B16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--
B16_bis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--	--	--
B17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--
B20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	X	X	X	X	X	X	X	X
B21	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	X	X	X	X	X	X	X	X
Case 5																					
B501	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B502	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	--	--	--
B503	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B504	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	--	--	--
B505	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B506	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	X	X	X
110B03	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	--	--	--
115B03	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	--	--	--
B03 RVW	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	--	--	--
B03 Acal	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B03 Spir	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	X	--	--	--
B03 Ashld	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B03 r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	--	--	--
B03 c	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B03 s	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--
B03 zi	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	X	--	--	--
B16 Acal	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	.	X	--	--	--
B16 Gruijters 1D	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	X	X	X	--	--	--

C.4.4 Debiet- en sedimentverdeling over Waal en Pannerdensch Kanaal

De debietverdeling wordt redelijk goed weergegeven. In Cases 2, 3 en 5 is de verhouding tussen Waal en Pannerdensch Kanaal rond de 2 (hoort ongeveer 2,3 te zijn), terwijl de verhouding bij Cases 1 en 4 tussen de 5 en 20 ligt. De sedimentverdeling varieert veel meer. De verhouding zou 3 à 5 moeten zijn. In Cases 2 en 3 is dit in sommige gevallen ook zo. In de andere cases komt dit geheel niet voor. Er is ook geen verband tussen debiet- en sedimentverhoudingen te ontdekken. Tabel C.6 geeft een overzicht.

Tabel C.6: Overzicht van debiet- en sedimentverhoudingen tussen Waal en Pannerdensch Kanaal.

Case 1							
	B01	B02	B02_bis	B02_ter	B13	B18	B19
Qwaal/Qpk	6,69	15,78	4,59	7,79	181,85	35,36	13,55
Swaal/Spk	4,14	84,00	5,00	11,57	--	--	--

Case 2										
	B03	B03_bis	B05	B06 Espir 0,8	B07 Espir 1,5	B08 Ashld 0,8	B09 Ashld 1,4	B10	B11	B12
Qwaal/Qpk	2,14	2,64	2,38	2,15	2,36	2,23	2,13	2,18	2,17	5,20
Swaal/Spk	7,00	4,97	2,96	5,63	8,41	4,50	14,00	--	4,95	1,16

	B14 Cshld 0,3	B15 Dshld 0,5	B03	B03 RVW	B03 Acal	B03 Spir	B03 Ashld	110B03 Q 2640	115B03 Q 2760
Qwaal/Qpk	4,71	2,14	2,14	2,25	2,21	2,18	2,05	2,54	2,83
Swaal/Spk	0,73	1,52	7,00	1,33	6,92	7,75	23,75	4,18	8,44

Flokstra										
	B03_Ashld_small	B03 Spiral	B03_spir_Ashld (B03r)	B03_spir_Ashld (B03r 1D)	B03_1D	B03_Tranl aag_groot	B03_Tranl aag_klein	B03	B03s	B03zi
Qwaal/Qpk	2,17	2,19	2,09	2,17	2,58	3,01	2,07	2,11	2,27	2,17
Swaal/Spk	2,00	7,92	15,91	10,78	3,25	7,92	6,17	7,00	1,50	20,00

Case 3							Gruijters 1D
	B16	B16_bis	B17	B20	B21	B16 Acal	
Qwaal/Qpk	2,97	2,43	2,70	2,13		3,63	
Swaal/Spk	2,77		2,94	115,00		6,44	

Case 4											
	B401	B402	B403	B404	B405	B406	B407	B408	B409	B410	B411
Qwaal/Qpk	13,05	7,86	6,84	13,12	14,16	15,11	8,84	10,21	18,51	13,72	2,05
Swaal/Spk	11,78	15,25	10,00	499,00	149,00	509,00	355,67	205,00	449,00	74,00	

Case 5						
	B501	B502	B503	B504	B505	B506
Qwaal/Qpk	1,77	1,83	2,15	1,74		1,72
Swaal/Spk	4,60	8,06	7,60	11,08		--

C.5 Opmerkingen en bevindingen

Het sedimenttransport wordt over het algemeen onderschat in vergelijking tot metingen. De sedimentverdeling op het splitsingspunt is sterk afhankelijk van de instelling van de parameters en randvoorwaarden. Over het algemeen is de afhankelijkheid sterker voor de sedimentverdeling dan de debietverdeling.

De breedtegemiddelde D_{50} is overal aan de grove kant in vergelijking met Gruijters et al (2001). De waarden in het Pannerdensch Kanaal komen over het algemeen het dichtst bij de waarden van Gruijters et al (2001). Ten opzichte van de breedtegemiddelde D_{50} in Sobek geldt dat het Pannerdensch Kanaal te fijn wordt en de Bovenrijn en Waal wat grover.

De randvoorwaarde voor het sedimenttransport wordt alleen gebaseerd op basis van waterdiepte en stroomsnelheid. Er is dus geen variatie in de transportrichting op basis van spiraalstroming en dwarshelling. Al het transport geschiedt loodrecht op de instroomrand.

In de gegradeerd-sedimentsimulaties verloopt de aanpassing van de bodemsamenstelling veel sneller dan de aanpassing van de bodemligging. De bodemsamenstelling past zich in de orde van enkele jaren aan, terwijl de bodemligging zich in de orde van een tiental jaren aanpast. Dit zou kunnen verklaren waarom de bodemligging in Case 5 het zo goed doet. Verder is het effect van de richtingsformule bij gegradeerd sediment klein. Dit zou ook door de snelle aanpassing van de bodemsamenstelling verklaard kunnen worden. Het lijkt alsof een soort afpleistering de bodemligging fixeert. Dit is onderwerp van nader onderzoek.

De berekende ruwheden in Cases 4 en 5 hebben niet het verwachte patroon. De oorzaak hiervan moet nog onderzocht worden. Dit verwerpt op het eerste gezicht de hypothese dat het effect van ruimtelijke variaties in korrelsamenstelling gecompenseerd wordt door het effect van ruimtelijke variaties in bodemruwheid. Het kan nog wel zo zijn dat er sprake is van een toevallige compensatie in een specifiek geval.

De dikte van de transportlaag beïnvloedt de aanpassingsnelheid van de bodemsamenstelling, zie B12, en B03_tranlaag_groot/klein. De transportlaagdikte kan gezien worden als een kalibratieparameter. Nader onderzoek is nodig.

C.6 Conclusies en aanbevelingen

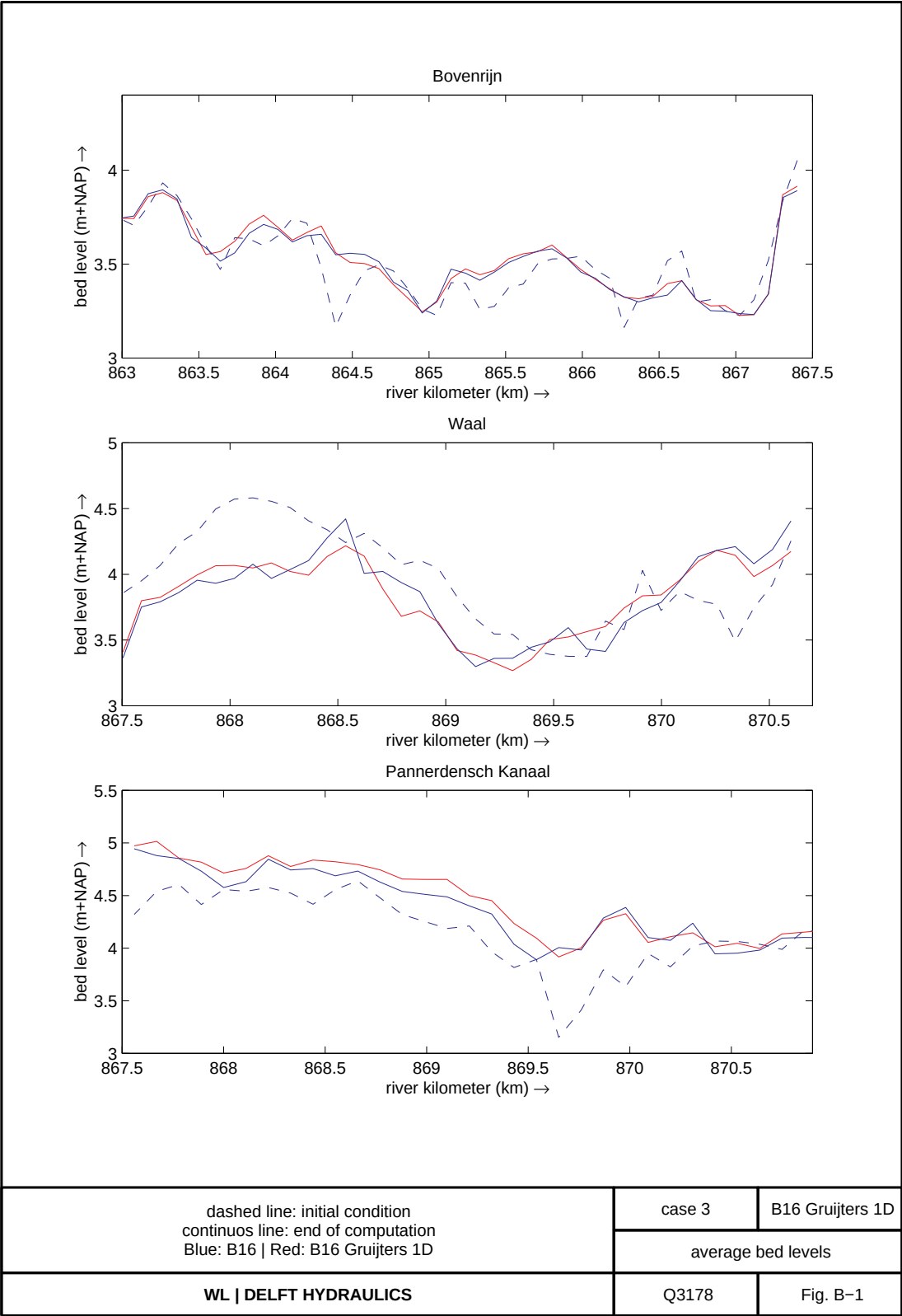
Van alle simulaties zijn er een paar die echt opvallen. Deze worden hieronder beschreven. Uit de simulaties B16 en B16_Gruijters_1D blijkt dat de laterale variatie in korreldiameter bij de beginsamenstelling een geringe invloed heeft op de uiteindelijke bodemligging en bodemsamenstelling. Dit is overeenkomstig de bevindingen van Frings en Kleinhans (2002). De bodemsamenstelling wordt hoofdzakelijk bepaald door de lokale stromingscondities. Paragraaf C.7 geeft figuren van de invloed van variaties in D_{50} over de breedte.

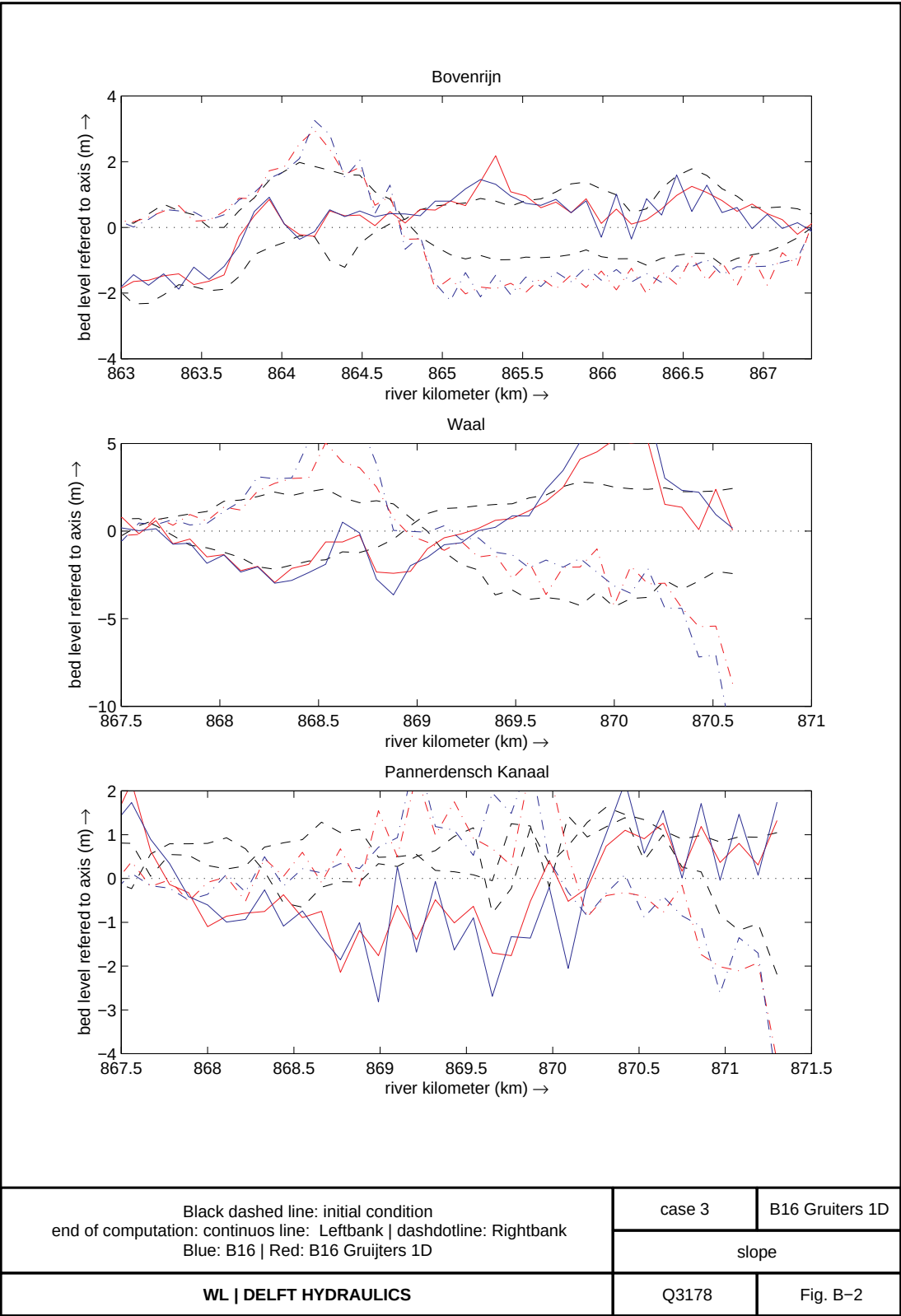
Uit de simulaties B03 en B03r blijkt dat de bodemligging niet door de richtingsformule wordt beïnvloedt. De gemiddelde D_{50} blijft ook redelijk het zelfde, maar de dwarsverdeling verandert wel. Paragraaf C.8 geeft figuren van de invloed van de richtingsformule.

Aanpassing van de morfologische randvoorwaarde (B03 RVW) laat zien dat ook hier de bodemligging niet erg veel verandert. De bodemsamenstelling en de sedimentverdeling worden wel sterk hierdoor beïnvloed. Paragraaf C.9 geeft figuren van de invloed van de morfologische randvoorwaarde.

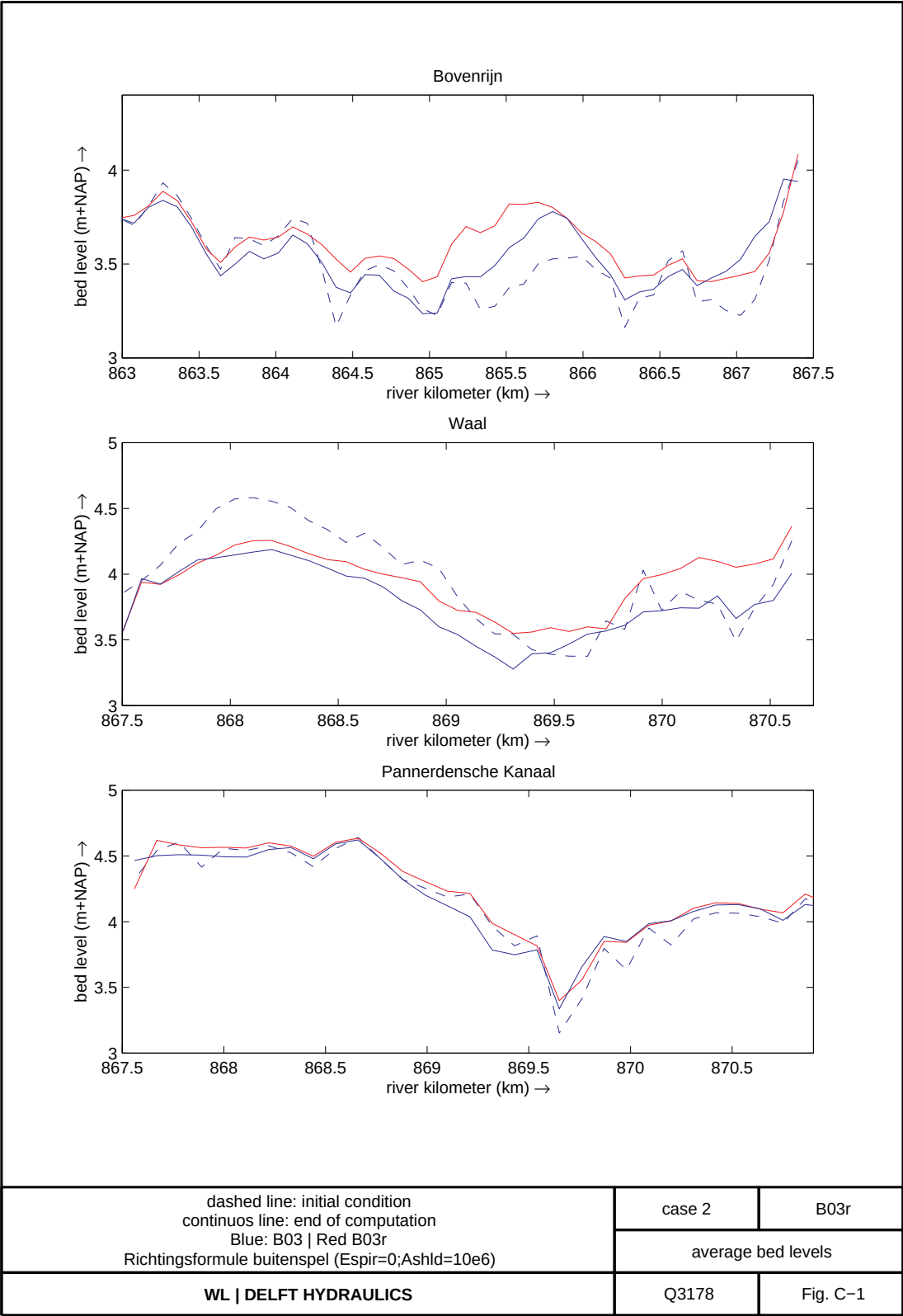
Voor het resterende deel van dit afstudeerwerk zal nader geanalyseerd worden waarom de bodemsamenstelling zich veel sneller aanpast dan de bodemligging. Vermoedelijk speelt de verhouding tussen de waterdiepte en de dikte van de actieve transportlaag daarbij een belangrijke rol. Indien mogelijk wordt ook nog gekeken naar het effect van een variabele afvoer op de morfologische ontwikkeling. Gezocht zal worden naar verklaringen voor de waargenomen fenomenen, om daarmee een uitspraak te kunnen doen over de betrouwbaarheid en gevoeligheid van het model.

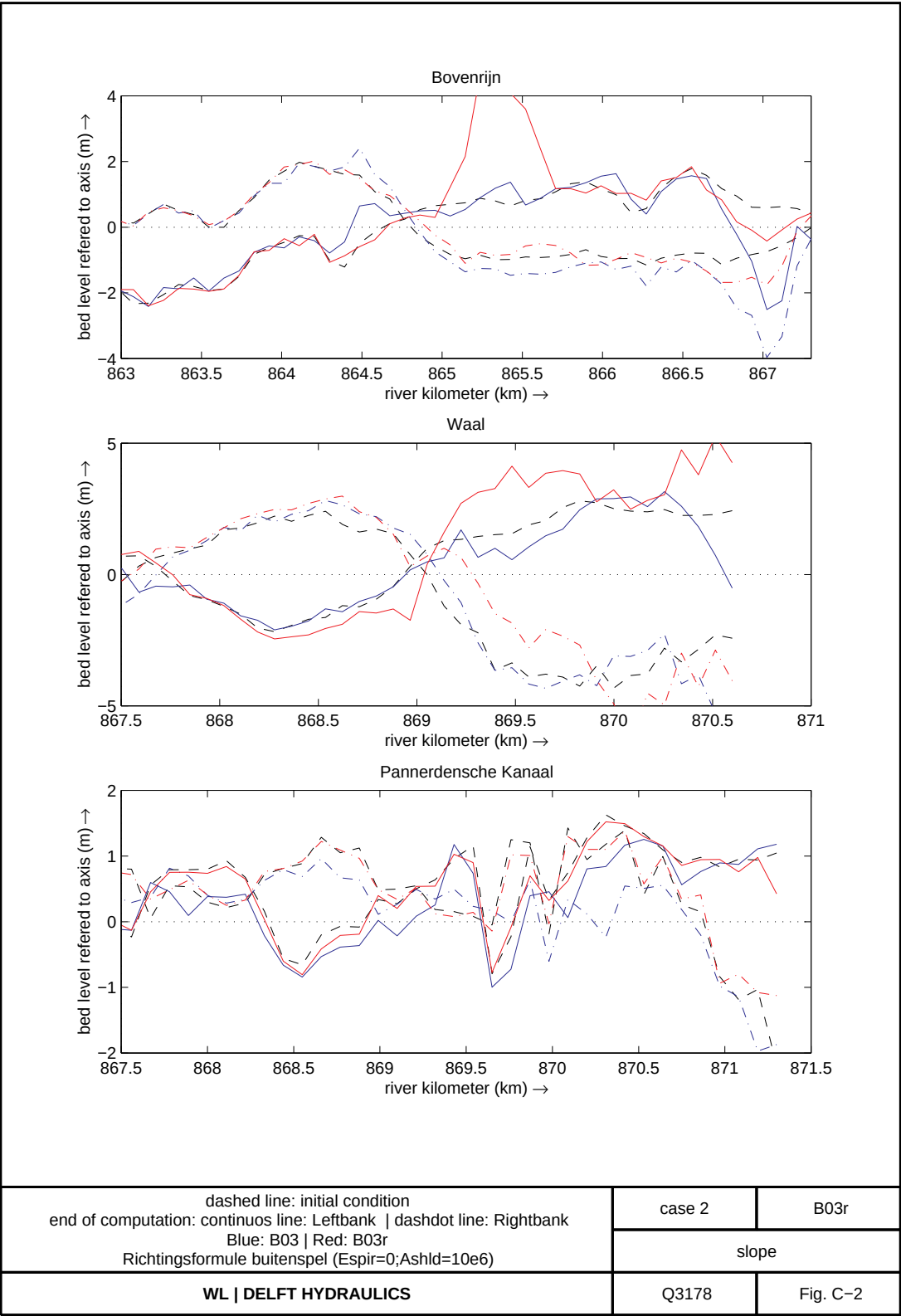
C.7 Figuren invloed breedtevariatie D_{50}

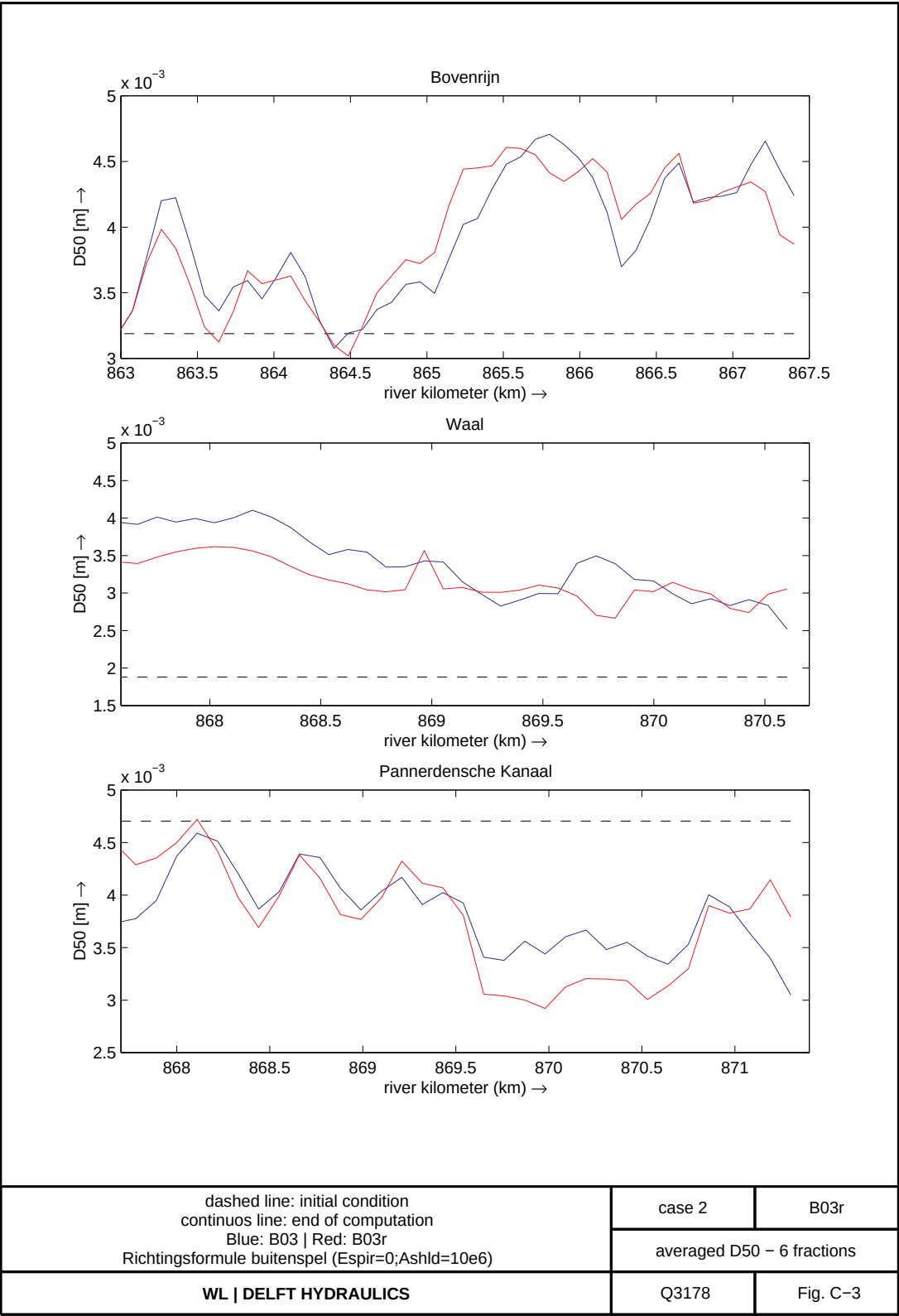


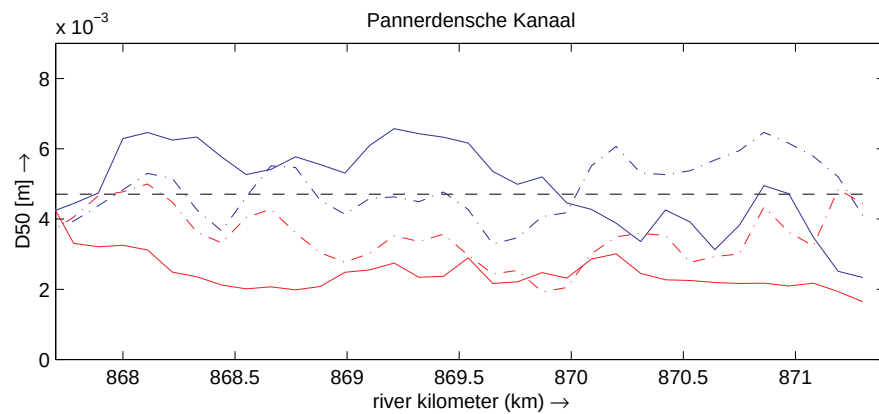
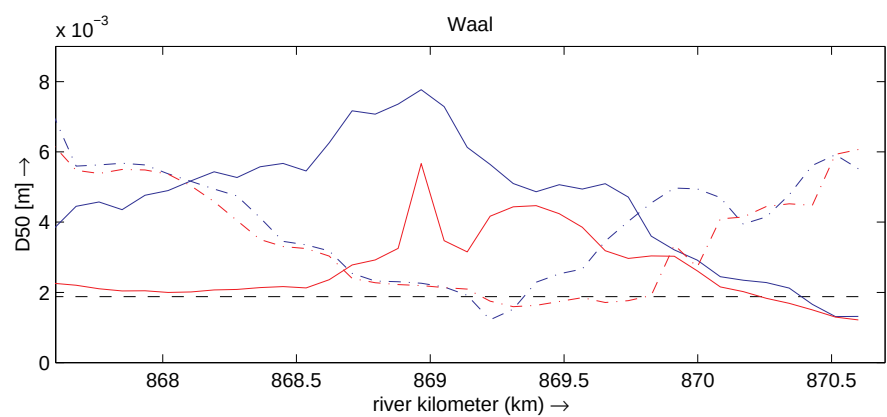
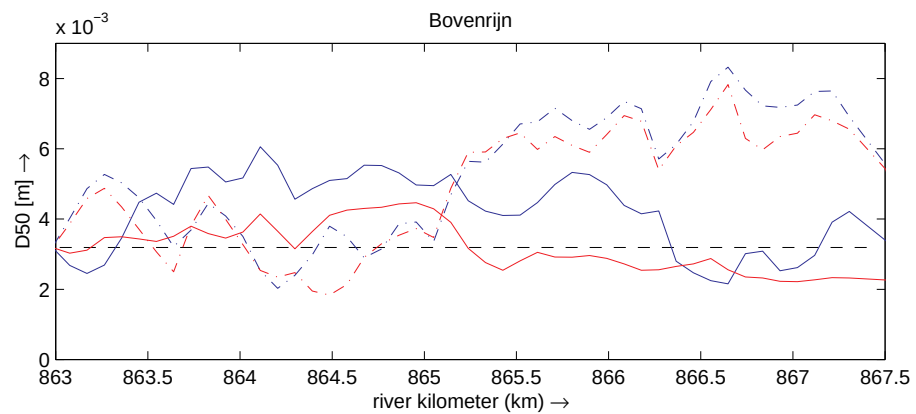


C.8 Figuren invloed richtingsformule



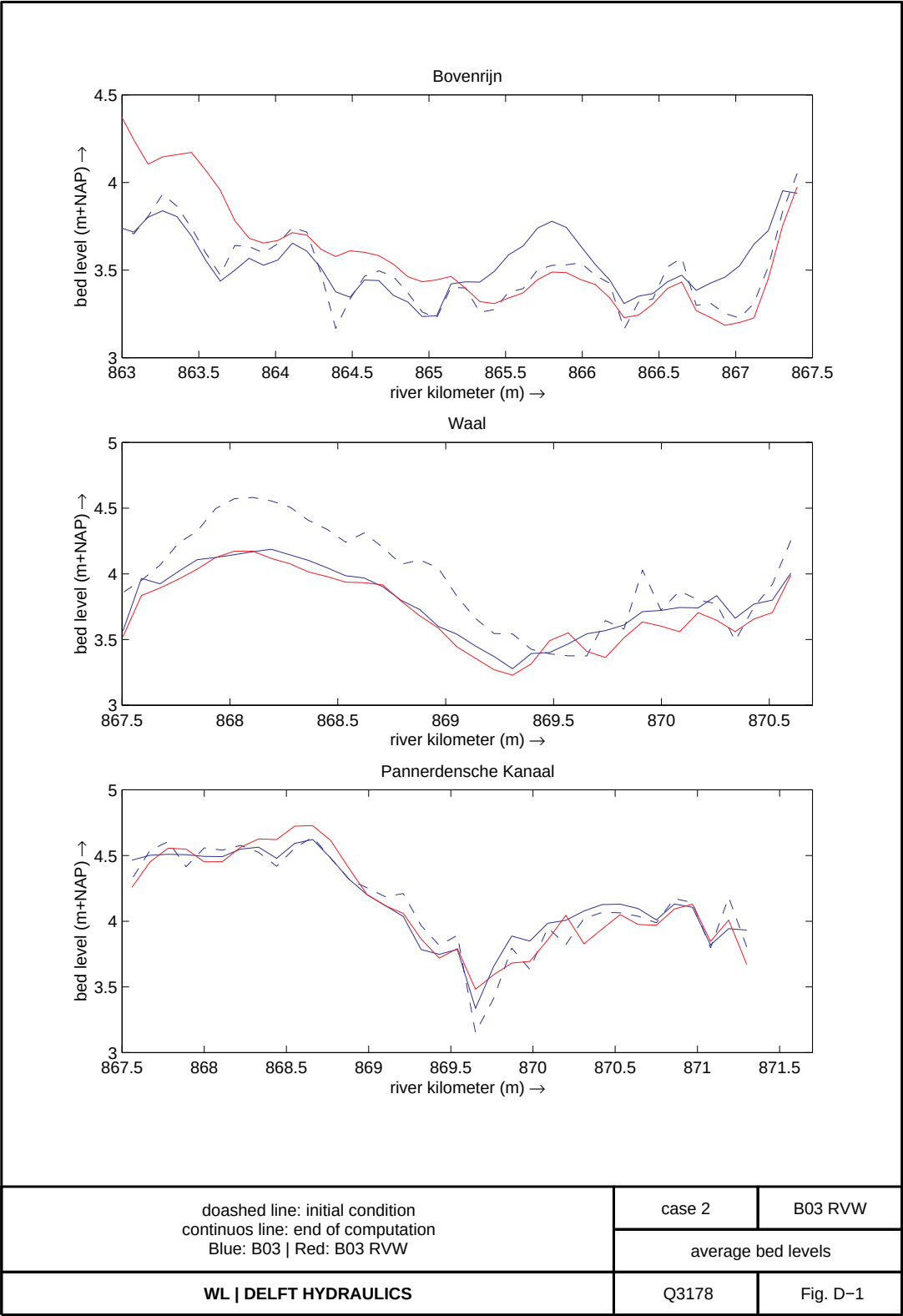


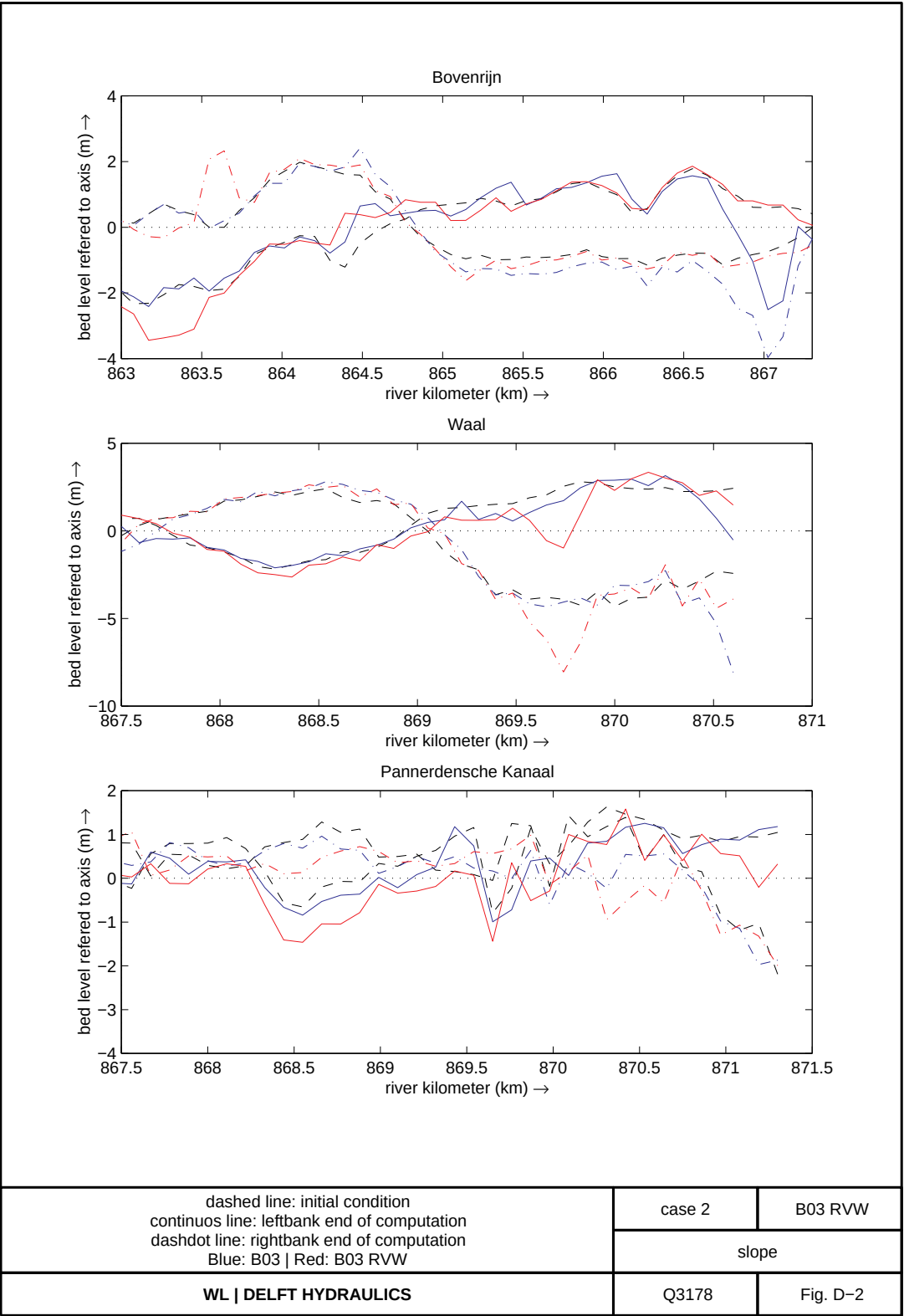


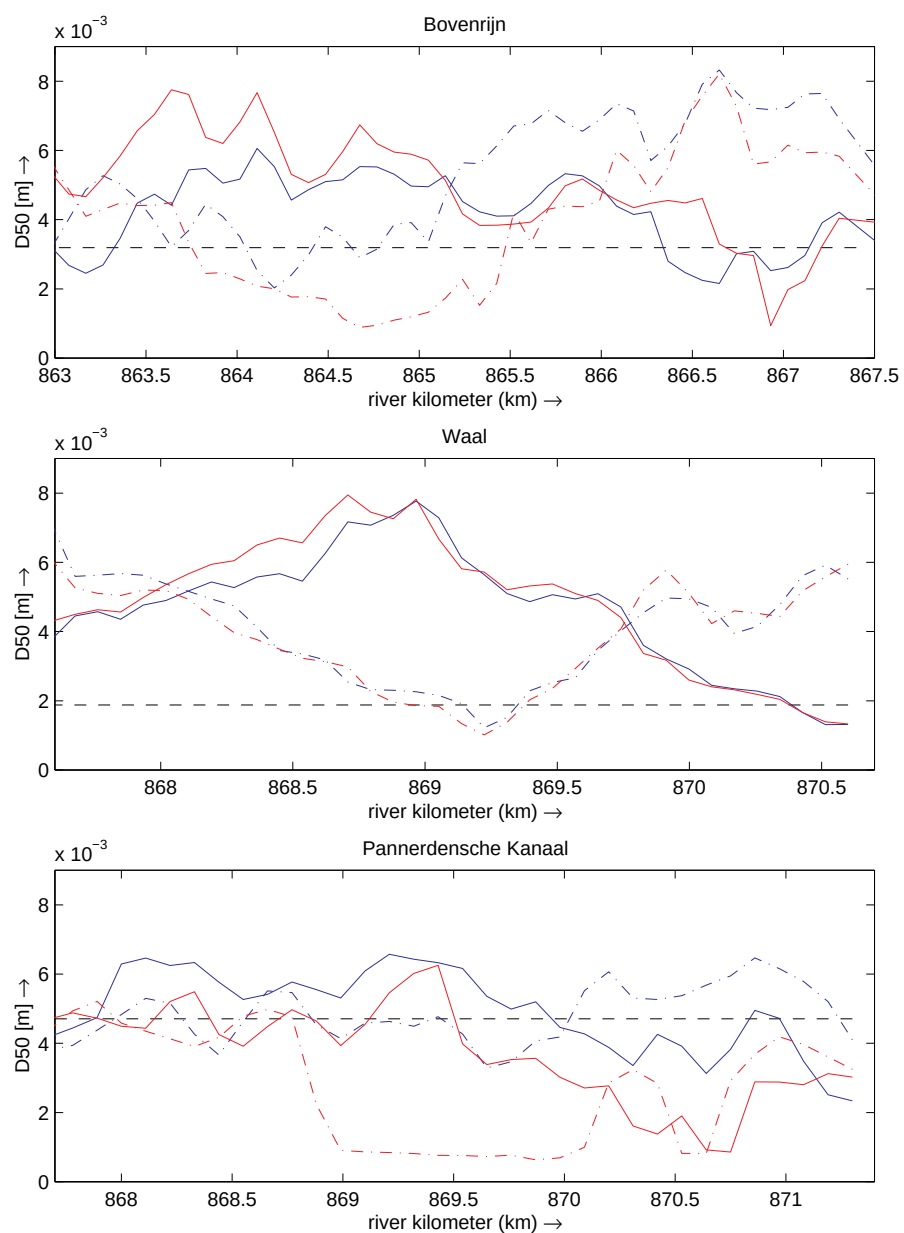


dashed line: initial condition end of computation: continuous line: Leftbank dashdot line: Rightbank Blue: B03 Red: B03r Richtingsformule buitenspel (Espir=0;Ashld=10e6)	case 2	B03r
	D50 – 6 fractions	
WL DELFT HYDRAULICS	Q3178	Fig. C-4

C.9 Figuren invloed morfologische randvoorwaarde







dashed line: initial condition end of computation: continuous line: Leftbank dashdot line: Rightbank Blue: B03 Red: RVW sediment transport	case 2	B03 RVW
	D50 – 6 fractions	
WL DELFT HYDRAULICS	Q3178	Fig. D-4

D Aanbevelingen naar aanleiding van Frings & Klein hans (2002)

D.1 Inleiding

Frings & Klein hans (2002) hebben de beddingsamenstelling rond de Pannerdensch Kop op basis van veldgegevens onderzocht. Zij komen tot de duidelijke conclusie dat antropogene en geologische invloeden voor de morfologie van de Pannerdense Kop van veel geringer belang zijn dan de actuele fluviatiele processen. WL | Delft Hydraulics heeft bij het onderzoek geadviseerd in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA (opdrachtnummer 8020963). Deze advisering is afgesloten met een memo dat per brief met kenmerk ZWS3663/Q3326/mh op 3 december 2002 aan Rijkswaterstaat RIZA is opgeleverd. Tevens zijn daarna nog enkele aanvullingen op het memo toegeleverd. Hieronder volgen bewerkte versies van het memo en de aanvullingen.

D.2 Memo bij brief ZWS3663/Q3326/mh

Het onderzoek toont duidelijk een kennisleemte ten aanzien van de vorming van ruimtelijke patronen van alluviale bodemruwheid onder variërende afvoeren en transport en substraat van gegradeerd sediment. Rijkswaterstaat RIZA bevestigt dat hier een belangrijke fundamentele vraag ligt, maar voegt tevens toe dat de hieruit volgende onzekerheid in vergelijking met andere onzekerheidsbronnen niet groot genoeg is om te rechtvaardigen dat Rijkswaterstaat opdrachten verleent tot onderzoek op dit terrein. Dit vraagstuk leent zich echter wel voor fundamenteel onderzoek aan universiteiten, en het is tegen die achtergrond dat onderstaande aanbevelingen gegeven worden.

Aanbevolen wordt om de vorming van alluviale bodemruwheid onder variërende afvoeren en met gegradeerd sediment te modelleren op basis van onderliggende fysische processen. Daarvoor is onder meer een model nodig dat de verdeling van duinhoogtes en tussenliggende trogdieptes koppelt aan een model voor bodemruwheid. Het gaat derhalve ook om de modellering van de vorming van duinen onder variërende afvoeren en met gegradeerd sediment. Hiermee zou de draad van het DUGRO-onderzoek binnen de TOW (Toegepast Onderzoek Waterstaat) weer worden opgepakt. De aandacht zou daarbij niet alleen gericht moeten worden op de klassieke vrije beddingvormen, maar ook op de door de riviergeometrie opgedrongen kribkuilen (ontgrondingskuilen) en kribvlammen (sedimenttruggen).

Een van de onderdelen van het DUGRO-onderzoek betrof de verticale profielen van de stroming, met correcte weergave van neren, turbulentie, etc. Toendertijd werd gewerkt met empirische sluitingsrelaties om deze effecten te parametriseren. Inmiddels lijken de jongste ontwikkelingen in de hydrodynamica uitzicht te bieden op een veel beter onderbouwde generieke modellering van de stroming (DNS = Direct Numerical Simulation van stroming over een golvende bodem). Te noemen vallen het werk van Boersma & Uittenbogaard (2003) en Hansen et al (2001).

Sorteringsprocessen van gegradeerd sediment compliceren de processen. Duinen komen dan tot stand door een interactie tussen (1) de kansdichtheidsverdeling van duinhoogtes en trogdieptes, (2) de verticale sortering en (3) stromingsparameters. Deze interactie is zeer complex en vereist uitgebreide nadere studie.

In nauwe relatie met de vorming van duinen speelt ook de horizontale sortering in rivierbochten een rol. Frings & Kleinhans (2002) geven het belang aan van de competitie tussen verticale sortering in duinen en horizontale sortering in bochten. Ook op dit terrein wordt onderzoek op basis van onderliggende fysische processen aanbevolen. Het continue verticale sorteringsmodel van Blom (2003) is voor het beschrijven van deze competitie bij uitstek geschikt. Dat model beschrijft de vorming van grove lagen tijdens hoogwaters en het achterblijven van deze lagen wanneer de duinen weer afnemen in grootte.

Wij hopen onderzoeksgroepen aan de Technische Universiteit Delft en de Universiteit Twente te kunnen interesseren voor onderzoek op dit terrein. Graag zouden we ook Rijkswaterstaat bij de opzet van dergelijk onderzoek betrekken.

D.3 Aanvullingen op memo bij brief ZWS3663/Q3326/mh

Een model voor de kansdichtheidsverdeling van duinhoogtes (en trogdieptes) is een belangrijke vereiste voor morfologische modellen. Voor *uniform* sediment bestaan er enkele modellen die een deterministische waarde voor de duinhoogte voorspellen, maar de uitkomsten gaan gepaard met een grote mate van onzekerheid. Voor *niet-uniform* sediment speelt de interactie tussen (1) de verdeling van duinhoogtes (en trogdieptes), (2) de verticale sortering en (3) stromingsparameters een belangrijke rol. Deze interactie is zeer complex en vereist uitgebreide nadere studie om een model voor de verdeling van duinhoogtes en trogdieptes te ontwikkelen.

Een ander belangrijk punt is de koppeling tussen een model voor de verdeling van duinhoogtes en trogdieptes en een model voor bodemvormruwheid. Dit vereist nadere studie.

De modellering van de sortering in rivierbochten (dat wil zeggen een model voor lateraal transport van sedimentfracties over dwarshellingen) voor situaties met duinen verdient nadere studie. Een dergelijk bochtsorteringsmodel is een essentieel onderdeel van een 2-dimensionaal morfologisch modelsysteem als Delft2D-Rivers. Experimenten gericht op sortering in bochten zijn helaas vaak gericht op situaties met een vlakke bodem. Het bochtsorteringsmodel dat momenteel wordt toegepast in Delft2D-Rivers is gebaseerd op gootexperimenten met duinen, maar met uniform sediment (Talmon et al, 1995). Ervaringen met het momenteel toegepaste model bevestigen de noodzaak van nadere studie.

Het nieuwe continue verticale sorteringsmodel (Blom, 2003) beschrijft de vorming van grove lagen tijdens hoogwaters en het achterblijven van deze lagen wanneer de duinen weer afnemen in grootte. Voor het beschrijven van het samenspel tussen de laterale sortering in rivierbochten en de verticale sortering in duinen is dit continue sorteermiddel bij uitstek geschikt. Hiervoor zal het model moeten worden geïmplementeerd in Delft2D-Rivers.

E Artikel Mosselman et al (2003) voor RCEM Symposium in Barcelona

Mosselman, E., K.I. Hassan & J. Sieben (2003), Effect of spatial grain size variations in two-dimensional morphological computations with uniform sediment. Artikel ingediend voor Third IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Barcelona, Spain, 1-5 September 2003.

EFFECT OF SPATIAL GRAIN SIZE VARIATIONS IN TWO-DIMENSIONAL MORPHOLOGICAL COMPUTATIONS WITH UNIFORM SEDIMENT

by Erik Mosselman¹, Kazi Iqbal Hassan² & Arjan Sieben³

ABSTRACT: Horizontal grain sorting produces spatial grain size variations that affect bed topography. Widely used two-dimensional morphological models with uniform sediment do not have physically-based submodels for grain sorting but do offer possibilities to vary grain sizes spatially. The effects of such spatial variations are analyzed through numerical tests using Delft3D with uniform sediment. The spatial variations are either imposed or flow induced. The imposed grain size pattern is found to suppress the occurrence of free alternate bars and to force a steady bar pattern. The flow-induced grain size variations are found to decrease bar heights. The findings for elementary cases help the interpretation of results from morphological computations in more complex situations. They show that caution is mandatory when modelling spatially varying grain sizes in the absence of a physically-based submodel for grain sorting.

1 INTRODUCTION

In the nineties, experiences with a two-dimensional morphological model had led to the conviction that the coarse-sand, fine-gravel bed morphology of the Dutch Rhine branches could be modelled very well by assuming, for each of the branches separately, a spatially constant bed roughness and spatially constant sediment grain sizes. Nonetheless, field data from these rivers indicated that bedform properties and sediment granulometry do vary spatially. A computation for the “Pannerdense Kop” Rhine bifurcation at Pannerden had therefore been repeated with spatially varying grain sizes. Surprisingly, it appeared no longer possible to reproduce the bed topography correctly. Mosselman et al (1999) demonstrated that this effect could be explained by a simplified linear analysis of the underlying equations.

These findings have had two effects on river morphological research in the Netherlands. Firstly, it has produced renewed attention to the details of sediment transport, bedform development and grain sorting on a smaller scale. New research proposals are currently under preparation, building upon recent work in the Netherlands regarding turbulence modelling (Boersma & Uittenbogaard, 2003), probabilistic description of turbulent bed shear stresses (Kleinhans & Van Rijn, 2002), bedform development (Hansen et al, 2001) and grain sorting (Kleinhans, 2002; Blom, 2003; Blom et al, 2003). Secondly, the forces on a national level have been joined by founding a “Morphological Triangle” in which universities, technological institutes and Rijkswaterstaat RIZA co-operate. In its mission statement, the Morphological Triangle directs all research towards better understanding and better predictions of the morphology of the Pannerdense Kop. This is not only because the issue of the effect of spatial variations arose from

¹ Delft University of Technology and WL | Delft Hydraulics, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands, Fax +31 15 285 8582, E-mail erik.mosselman@wldelft.nl

² Institute of Water Modelling (IWM), House No.476, Road No.32, New DOHS, Mohakhali Dhaka-1206, Bangladesh

³ Rijkswaterstaat RIZA, P.O. Box 9072, 6800 ED Arnhem, The Netherlands

computations for this bifurcation, but also because the whole system of the Dutch Rhine branches depends sensitively on the sediment distribution at its bifurcations (Wang et al, 1995).

The companion paper by Sloff et al (2003) provides the present state-of-the-art in the morphological modelling of the Pannerdense Kop using Delft3D with *graded* sediment. However, most two-dimensional morphological models currently in use still assume *uniform* sediment. These models do offer the possibility to vary grain sizes spatially, but they cannot compute spatial grain size variations on the basis of some physically-based submodel for grain sorting. The possibility to vary the grain sizes is often used, either to match sediment data from the field or simply to tune the results during calibration. The objective of this paper is therefore to assess the effects of this practice. The influences on free and forced bars in a straight channel are analyzed through numerical tests using Delft3D with uniform sediment. The findings for these elementary cases help in interpreting and evaluating model results for more complex situations. They also constitute a warning that caution is mandatory when modelling spatially varying grain sizes in the absence of a physically-based submodel for grain sorting.

2 THEORY

Grain size variations are the product of grain sorting processes. The classical mathematical description is based on (i) division of the sediment mixture into separate fractions, (ii) transport formulae and mass conservation equations for each of the separate fractions, (iii) hiding-and-exposure corrections to the critical shear stress of each of the fractions, and (iv) an active layer or transport layer affected by erosion and sedimentation (Hirano, 1972). A new mathematical model concept has been developed by Parker et al (2000) and Blom (2003). This concept is depth-continuous and has the advantage that it accounts for vertical sorting processes in the absence of net aggradation or degradation, including upward fining within bed forms.

This paper, however, uses much simpler concepts that are not physically based and that allow the use of a morphological model with uniform sediment. In the $D(x,y)$ concept, the spatial variations are imposed as a function of the co-ordinates in the horizontal x,y-plane. In the $D(u)$ concept, the local average grain size is a function of local flow velocity, based loosely on the idea that grain sorting leads to coarsening of the bed in areas of high flow velocities. For the latter concept, Mosselman et al (1999) derive relations for bar wave length and damping length from the simplified linear model of Struiksmma et al (1985). Assuming absence of spatial bed roughness variations, these relations read

$$\frac{L_p}{\lambda_w} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \left(\frac{\lambda_w}{L_D}\right)^2}} \quad (1)$$

$$\frac{L_D}{\lambda_w} = \frac{4}{2\frac{\lambda_w}{\lambda_s} + 2 - \left(b - 1 + \alpha\Psi_D\right)} \quad (2)$$

where L_P is the wave length of forced bars, L_D is the damping length of forced bars, λ_w is the adaptation length of water motion, λ_s is the adaptation length of bed topography and b , α and Ψ_D are degrees of nonlinearity defined by

$$b = \frac{u_0}{s_0} \frac{\partial s}{\partial u}; \quad \alpha = \frac{u_0}{D_0} \frac{\partial D}{\partial u}; \quad \Psi_D = \frac{D_0}{s_0} \frac{\partial s}{\partial D} \quad (3)$$

in which u denotes depth-averaged flow velocity, s denotes volumetric sediment transport per unit width including pores and D denotes sediment grain size. Subscripts “0” refer to reach-averaged values (zero-order solution). The adaptation lengths are defined by

$$\lambda_w = \frac{C_0^2 h_0}{2g}; \quad \lambda_s = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{B}{h_0} \right)^2 f(\theta_0) h_0 \quad (4)$$

in which B is the channel width, h is the flow depth, C is the Chézy coefficient for hydraulic roughness, g is the acceleration due to gravity and $f(\theta_0)$ is a weighing function for the effect of transverse bed slopes on sediment transport direction.

As $\alpha > 0$ and $\Psi_D < 0$, Equations 1 and 2 imply that spatial grain size variations decrease the damping length and increase the wave length. The simplified linear analysis for the $D(u)$ concept predicts hence that spatial grain size variations make bars lower and longer.

3 METHOD AND MATERIALS

Numerical tests were carried out using the FLOW and MOR modules of Delft3D with uniform sediment (Struiksmma, 1985; Struiksmma et al, 1985; Olesen, 1987, WL | Delft Hydraulics, 2001a,b). The basic configuration was derived from Struiksmma & Crosato's (1989) mobile-bed experiments with uniform sediment in a straight flume with an upstream groyne (Fig. 1, Table 1). These experiments resulted in a steady alternate bar pattern with a wave length of 6.6 m and amplitudes decreasing in downstream direction (Fig. 2). The values for key parameters of the two-dimensional morphology were determined from a calibration of the model against the experimental data (Table 2). The computational grid was uniform rectilinear with longitudinal spacings of 0.25 m and transverse spacings of 0.10 m.

Both the $D(x,y)$ concept and the $D(u)$ concept were investigated. The $D(x,y)$ concept was applied by specifying a steady grain size distribution according to

$$D(x,y) = D_0 + \hat{D} \cos\left(\frac{2\pi}{L_P} x + \varphi\right) \cos\left(\frac{\pi}{B} y\right) \quad (5)$$

where φ denotes phase. The $D(u)$ concept was formulated as

$$D(x, y) = D_0 \left(\frac{u(x, y)}{u_0} \right)^\alpha \quad (6)$$

The $D(u)$ concept required an iterative procedure in which computed velocity fields were used to derive a new grain size field for each next computation. Starting with homogeneous bed material, the computation was repeated several times until the spatial distribution of grain sizes complied with the velocity field.

In the laboratory experiments, the steady alternate bar pattern had been forced by a groyne near the inflow section, but in the numerical computations the pattern was forced by applying an asymmetric sediment supply at the inflow boundary. For the $D(x, y)$ concept, the behaviour of free alternate bars was computed as well by randomly varying the sediment supply asymmetry in time. Thus three cases arise (Table 3). Case 1 deals with bars forced upstream and imposed spatial grain size variations, Case 2 with bars forced upstream and flow-induced grain size variations and Case 3 with free bars and imposed grain size variations.

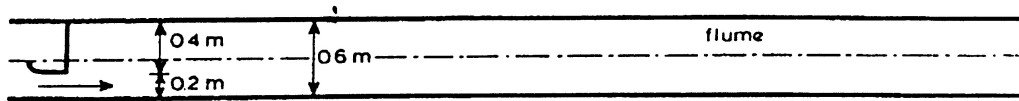


Figure 1: Plan view of straight-flume experiment by Struiksma & Crosato (1989)

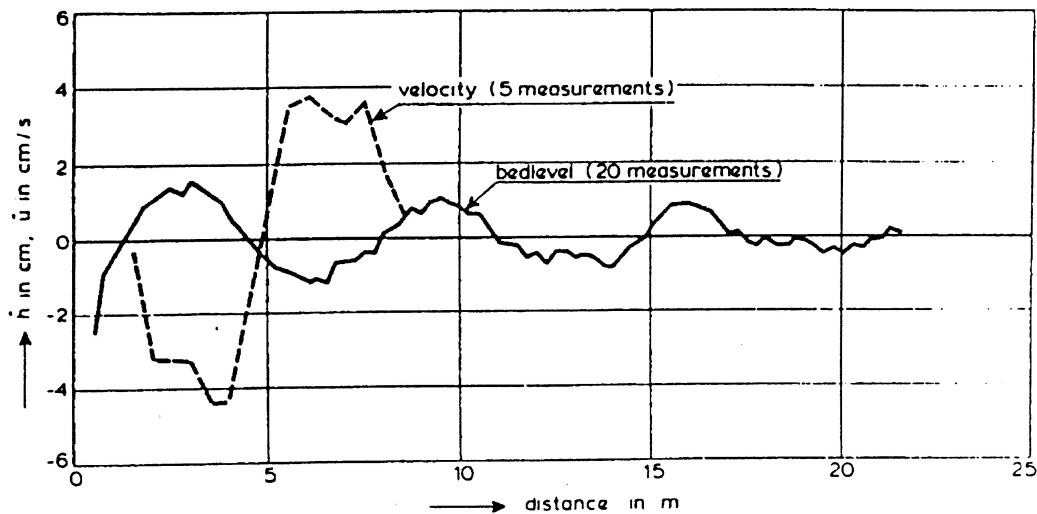


Figure 2: Steady alternate bar pattern in experiment of Struiksma & Crosato (1989)

Table 1: Conditions of straight-flume experiment by Struiksma & Crosato (1989)

Flume length	Flume width	Dis-charge	Water depth	Flow velocity	Water surface slope	Chézy coefficient	Froude number	Shields number	Transport incl. pores
(m)	(m)	(l/s)	(m)	(m/s)	(‰)	(m ^{1/2} /s)	(-)	(-)	(m ³ /h)
24	0.60	6.85	0.044	0.26	3.00	22.6	0.39	0.37	2.0·10 ⁻³

Table 2: Calibrated values of key parameters for two-dimensional morphology

Spiral motion	Effect of transverse bed slopes on transport direction		Numerical stability
ESPIR (-)	ASHLD (-)	BSHLD (-)	ALFSTA (-)
0.5	1.90	0.5	1.3

Table 3: Cases of numerical experiments

	D(x,y)	D(u)
Bars forced upstream	Case 1	Case 2
Free bars	Case 3	not carried out

3 RESULTS

In Case 1, with bars forced upstream and imposed grain size variations, the bars assume the wave length of the imposed $D(x,y)$ pattern. Hence they are forced entirely by the spatial variations in sediment grain size. The response to the asymmetric sediment supply at the inflow boundary is suppressed. Bars arise where the sediment is coarse, pools where the sediment is fine. This is due to sedimentation in areas of lower transport capacity and erosion in areas of higher transport capacity. That this is the opposite of what is observed in nature can be explained from the absence of a physically-based sorting mechanism.

Figures 3 to 8 show how the flow velocity field and the granulometry evolve in Case 2 with bars forced upstream and flow-induced grain size variations. Initially the same bed topography and flow velocity field are formed as in the experiments of Struiksmā & Crosato. Application of Eq. 6 with $\alpha = 1$ yields a spatial grain size distribution in phase with the flow velocity (Fig. 3). The first iteration step results in higher bars downstream and hence a stronger near-wall flow velocity oscillation with a phase opposite to the grain size pattern (Fig. 4). This immediate response can be understood from the findings for the $D(x,y)$ concept, i.e. bars arise where the sediment is coarse and pools where the sediment is fine. In subsequent iteration steps, a pattern develops gradually in which the grain size distribution matches the flow and bed topography fields (Figs. 5-8). This development starts upstream and gradually progresses downstream. The resulting bars and associated flow velocity oscillations are in the end much lower than the original ones.

Case 3, with free bars and imposed grain size variations, appears to yield the same results as Case 1. The free bars generated randomly at the inflow boundary are suppressed completely.

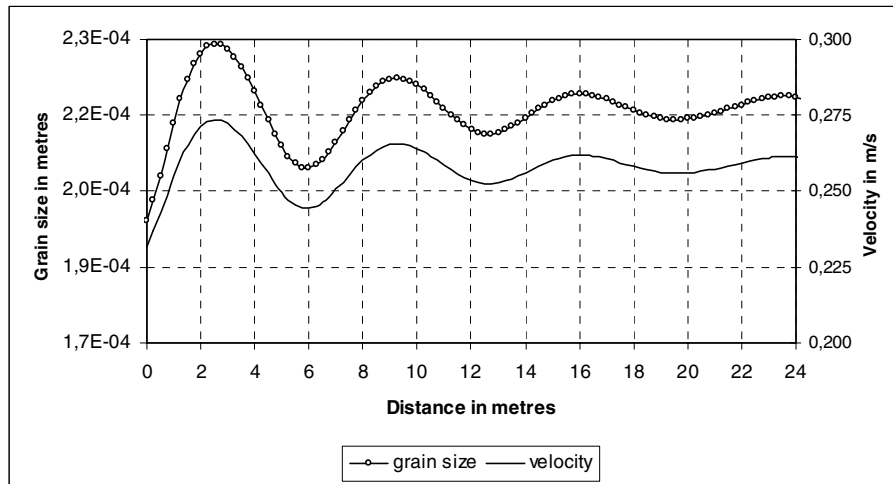


Figure 3: Initial near-wall flow velocity and associated granulometry in Case 2

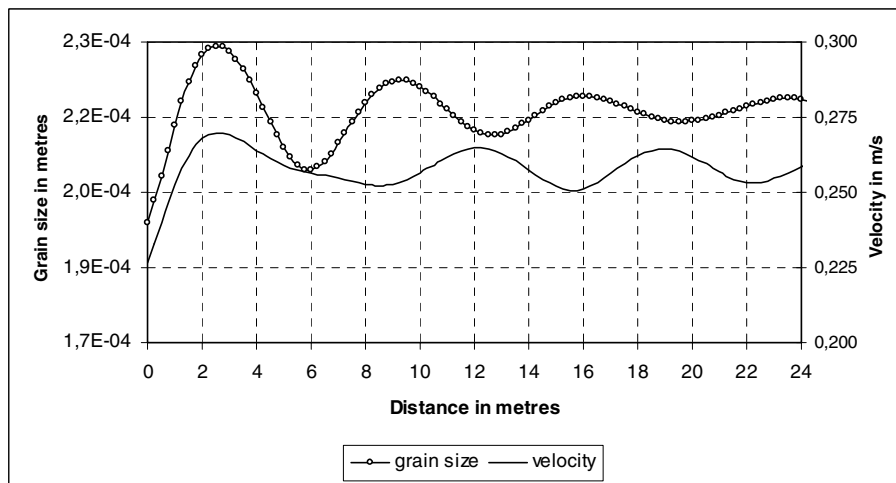


Figure 4: Near-wall flow velocity and granulometry in Case 2 after first iteration step

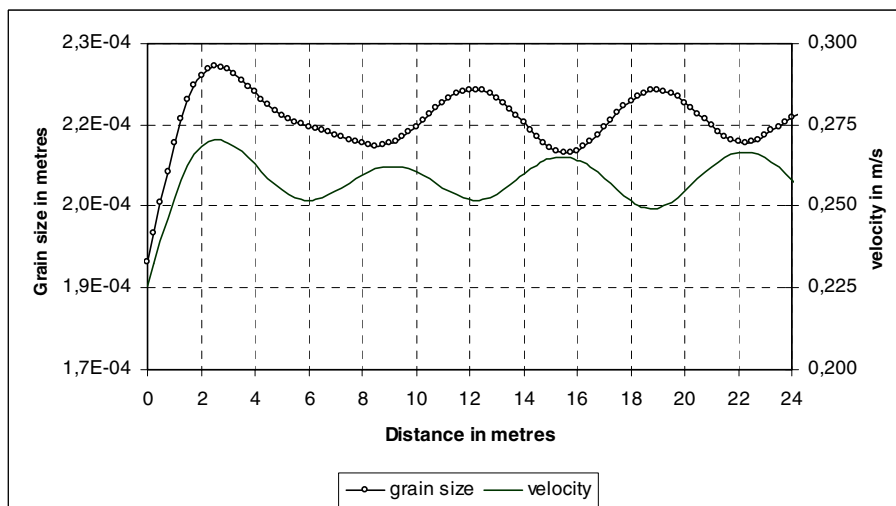


Figure 5: Near-wall flow velocity and granulometry in Case 2 after second iteration step

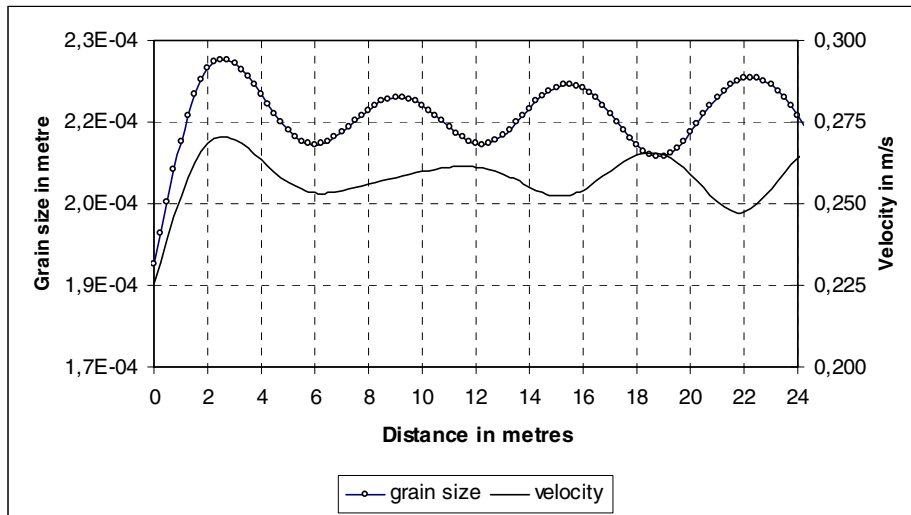


Figure 6: Near-wall flow velocity and granulometry in Case 2 after third iteration step

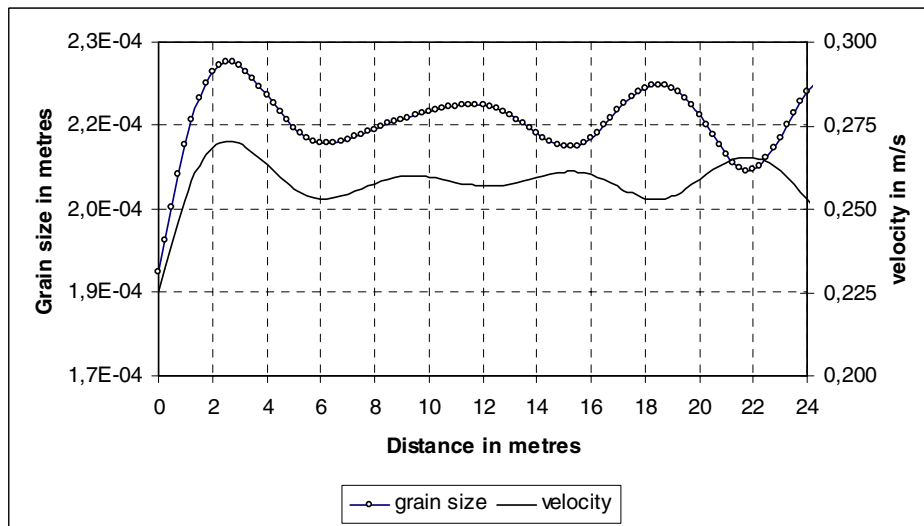


Figure 7: Near-wall flow velocity and granulometry in Case 2 after fourth iteration step

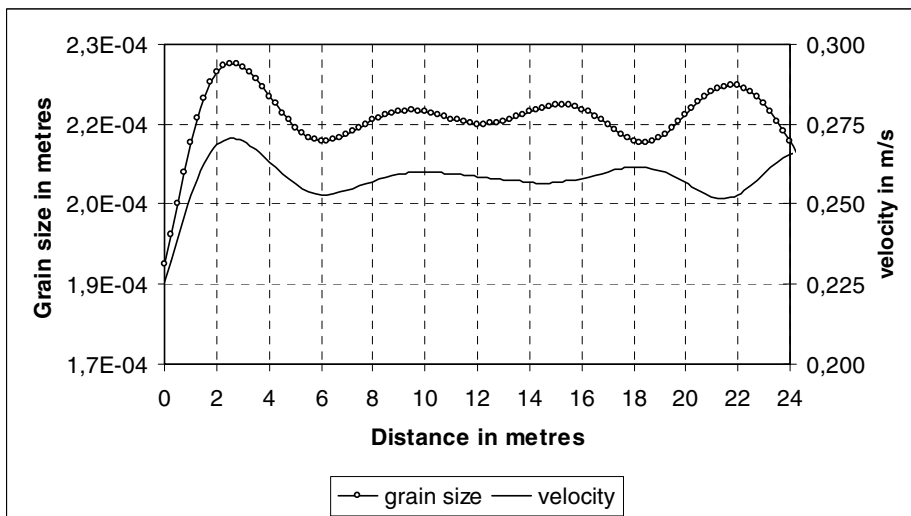


Figure 8: Near-wall flow velocity and granulometry in Case 2 after fifth iteration step

4 DISCUSSION

The simple $D(x,y)$ and $D(u)$ concepts are not physically based. An obvious restriction is that they violate the principle of sediment continuity by implying that transported sediment changes its grain size when it passes over a bed of different sediment composition. Nevertheless, the findings do have a bearing on the understanding of the real physical processes. If sorting processes are slow with respect to bed level changes, spatial grain size variations in the field can be expected to have a forcing effect similar to the effect of an imposed $D(x,y)$ distribution. The computations for the $D(u)$ concept show a competition between the principle that the sediment is coarser in areas of strong currents and the principle that sedimentation occurs in areas of coarse sediment. This competition is found to reduce bar heights, in line with the flattening of bars due to graded sediment found by Lanzoni & Tubino (1999) and Lanzoni (2000).

The $D(u)$ concept has been based loosely on the idea that grain sorting leads to coarsening of the bed in areas of high flow velocities. The difference with physically-based grain sorting mechanisms, apart from the violation of sediment continuity, is that the instantaneous adaptation expressed by this concept ignores spatial and temporal lag effects. Spatial lag effects may be negligible when the corresponding adaptation lengths are small with respect to bar length. On the contrary, recent observations of the bed composition at the Pannerdense Kop suggest that temporal lag effects are not negligible at all (Frings & Kleinhans, 2002).

Basically, spatial variations in any input field parameter can be expected to force the bed topography in a way similar to variations in grain size. Indeed other numerical computations, not reported here, confirm that spatial variations in bed roughness affect bed topography. Mosselman et al (1999) hypothesized that the old computations for the Pannerdense Kop with constant grain size and constant bed roughness had been successful because the effect of spatial grain size variations is in reality counterbalanced by the effect of spatial variations in bed roughness. If this would be found to be true, the question would remain whether this is a coincidence for the Dutch Rhine branches or a manifestation of a more universal principle. In the latter case, one might question the need of employing a physically-based submodel for erosion, transport and deposition of graded sediment in two-dimensional morphological models for rivers with a bed consisting of coarse sand and fine gravel. Without evidence of such a universal principle, the present findings and the companion paper by Sloff et al (2003) suggest that including a physically-based submodel for graded sediment is a necessity.

5 CONCLUSIONS

An imposed grain size pattern forces a steady bar pattern while suppressing the occurrence of free alternate bars and bars forced by an upstream perturbation. Flow-induced grain size variations decrease bar heights, which can be understood as a result from a competition between the principle that the sediment is coarser in areas of higher flow velocities and the principle that sedimentation occurs in areas of coarser sediment. Caution is hence mandatory in the common practice that, for calibration or the matching of field data, grain sizes are varied spatially in two-dimensional morphological models with uniform sediment.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at WL | Delft Hydraulics in the framework of joint morphological research by WL | Delft Hydraulics and Rijkswaterstaat RIZA. The work by the second author served the partial fulfilment of the requirements for the Masters of Science degree at the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE), Delft.

REFERENCES

1. Blom, A. (2003), *A continuum vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes*. Ph.D. Thesis, Twente University, Enschede, The Netherlands.
2. Blom, A., J.S. Ribberink & H.J. de Vriend (2003), Vertical sorting in bed forms: Flume experiments with a natural and a tri-modal sediment mixture. *Water Resources Research*, AGU, **39**, 2, 10.1029/2001WR001088.
3. Boersma, B.J. & R. Uittenbogaard (2003), Surface stress distributions and secondary motion in the turbulent flow above a wavy surface. Submitted to *Journal of Fluid Mechanics*.
4. Frings, R.M. & M.G. Kleinhans (2002), *Sedimentsortering en transportlaagdynamiek; Geologische, antropogene en alluviale invloeden op de bedding-samenstelling van de Rijn rond de Pannerdensche Kop*. ICG Rapport 02/7, Netherlands Centre For Geo-ecological Research (*in Dutch*).
5. Hansen, J.L., M. van Hecke, A. Haaning, C. Ellegaard, K.H. Andersen, T. Bohr & T. Sams (2001), Pattern formation – Instabilities in sand ripples. *Nature*, **410**, 6826, p.324.
6. Hirano, M. (1972), Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of non-uniform material. *Transactions JSCE*, **4**.
7. Kleinhans, M.G. (2002), *Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers*. Netherlands Geographical Studies **293**, Utrecht, ISSN 0169-4839.
8. Kleinhans, M.G. & L.C. van Rijn (2002), Stochastic prediction of sediment transport in sand-gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **128**, 4, pp.412-425.
9. Lanzoni, S. & M. Tubino (1999), Grain sorting and bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, **393**, pp.149-174.
10. Lanzoni, S. (2000), Experiments on bar formation in a straight flume; 2. Graded sediment. *Water Resources Research*, AGU, **36**, 11, pp.3351-3363.
11. Mosselman, E., A. Sieben, K. Sloff & A. Wolters (1999), Effect of spatial grain size variations on two-dimensional river bed morphology. *Proceedings IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Genova, 6-10 Sept. 1999, Vol. I, pp.499-507.
12. Olesen, K.W. (1987), Bed topography in shallow river bends. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, **87-1**, Delft University of Technology, ISSN 0169-6548.
13. Parker, G., C. Paola & S. Leclair (2000), Probabilistic Exner sediment continuity equations for mixtures with no active layer. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **126**, 11, pp.818-826.

14. Sloff, C.J., M. Bernabè & T. Baur (2003), On the stability of the Pannerdense Kop river bifurcation. *Third IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Barcelona, 1-5 September, 2003.
15. Struiksma, N. (1985), Prediction of 2-D bed topography in rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **111**, 8, pp.1169-1182.
16. Struiksma, N., K.W. Olesen, C. Flokstra & H.J. de Vriend (1985), Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, **23**, 1, pp.57-79.
17. Struiksma, N. & A. Crosato (1989), Analysis of a 2-D bed topography model for rivers. In: *River meandering*, AGU, Water Resources Monograph **12**, Eds. S. Ikeda & G. Parker, pp.153-180.
18. Wang, Z.B., R.J. Fokkink, M. de Vries & A. Langerak (1995), Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, **33**, 6, pp.739-750.
19. WL | Delft Hydraulics (2001a), *Delft3D-FLOW user manual*. Version 3.06.
20. WL | Delft Hydraulics (2001b), *Delft3D-MOR user manual*. Version 3.00.

F Artikel Sloff et al (2003) voor RCEM Symposium in Barcelona

Sloff, C.J., M. Bernabè & T. Baur (2003), On the stability of the Pannerdense Kop river bifurcation. Artikel ingediend voor Third IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM), Barcelona, Spain, 1-5 September 2003.

ON THE STABILITY OF THE PANNERDENSE KOP RIVER BIFURCATION

Dr. C.J. Sloff¹, M. Bernabè² and Dr. T. Baur³

ABSTRACT

The morphological development and stability of the river bifurcations has become an important research issue in The Netherlands. One of the major river bifurcations of the Rhine River, the 'Pannerdense Kop', plays an essential role in water-distribution and navigation routes. This makes stringent demands on its stability. Most essential for morphological predictions for such a bifurcation is the accurate simulation of sediment distribution towards the lower branches. Analysis of a laboratory experiment and detailed prototype data for the Pannerdense Kop showed that there particularly graded-sediment processes (vertical and transversal sorting) are dominant parameters. It was found that with a state-of-the-art two-dimensional morphological model it was possible to reproduce the observed behaviour when a combination of spatially varying grain size (graded-sediment) and spatially varying roughness (alluvial roughness prediction) is used.

1. INTRODUCTION

Pannerdense Kop research project

River bifurcations are known to show an unstable morphological behaviour under certain conditions. The question whether a bifurcation is unstable or stable is relevant often for maintenance of the river branches, as well as for the long-term predictions of a river system. In this light, three major river bifurcations of the lower Rhine Delta in the Netherlands are presently subject of a national research co-operation project. The co-operation between Universities, Ministry and Technical Research Institutes is managed through the "Morphological Triangle", which is a sub-division of the NCR (Netherlands Centre for River Research) established for co-ordinating river-morphological



Figure 1 Aerial photograph of Pannerdense Kop bifurcation

¹ Delft University of Technology & WL | Delft Hydraulics, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands, Fax: +31 15 285 85 82, Email: kees.sloff@wldelft.nl

² University of Trento, Department of Environment and Land Use Engineering, Via Mesiano 77, 38050 Trento, Italy, Fax: (+39) 0461 88 1999, Email: michele.bernabe@provincia.tn.it

³ WL | Delft Hydraulics, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands, Fax: +31 15 285 85 82, Email: Tillmann.Baur@wldelft.nl

research in the Netherlands. Joining forces enables us to combine the impressive field-data sets of Rijkswaterstaat-RIZA (Ministry of Water Resources and Public Works) and TNO-NITG (Geological Survey), the laboratory and mathematical modelling at WL | Delft Hydraulics, Delft University and Twente University, and the geomorphological analysis of University of Utrecht.

With respect to the modelling approaches, special attention is paid to finding ways to improve mathematical models for simulating the behaviour of these bifurcations. Due to the availability of an impressive database on flow, sediment and bed-level measurements it was chosen to use the first river bifurcation of the Rhine River after entering the Netherlands, the *Pannerdense Kop*, as main case for this study. In figure 1 an aerial photograph of the bifurcation and its branches is shown, also illustrating the extent of navigation and sediment deposits (sandy beaches) in groyne sections. Some relevant characteristics of the bifurcation and its branches are summarised in Table 1.

Table 1 Some characteristics of the river branches near the Pannerdense Kop

	Boven-Rijn	Waal	Pannerdens Kanaal
Width main channel	340 m	260 m	135 m
Char. Average discharge for morphology	2135 m ³ /s	1463 m ³ /s (situation 2000)	672 m ³ /s (situation 2000)
Grain size D_{50} (width averaged)	2,2 mm (in 2000)	1,7 mm	2,8 mm
Grain size D_{90} (width averaged)	9 mm	7 mm	10 mm
Slope (roughly)	$10 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Chézy roughness	53 m ^{1/2} /s	50 m ^{1/2} /s	50 m ^{1/2} /s
Depth	5,5 m	5,6 m	5,3 m

It should be noted that the Pannerdense Kop river bifurcation is not of natural origin, but was man-made through the excavation of the Pannerdens Kanaal between 1701 and 1707. The new bifurcation was needed to replace the slowly closing old river branch towards the North as shown in figure 2. Presently the river system, including the bifurcation, is undergoing large-scale erosion caused by rigorous normalisation works that were implemented last century.

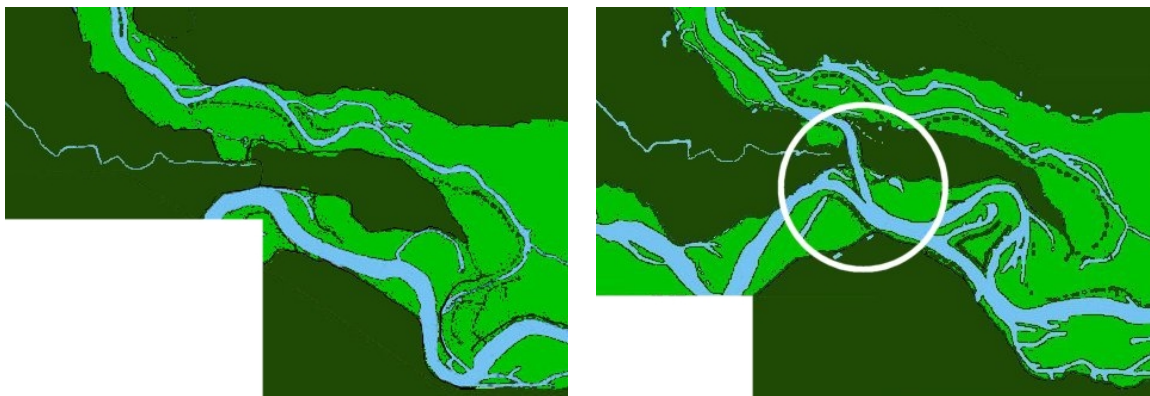


Figure 2 Situation in 1700 before excavation of Pannerdens Kanaal (left) and in 1800 after excavation (right) and closure of old branch (location of Pannerdense Kop is indicated by the circle).

As the Pannerdense Kop is considered to be the main control for water distribution in the Netherlands, the conservation of its stability is nowadays of utmost importance for the Netherlands.

The main modelling-related research questions

Based on previous studies on channel-bifurcations and the modelling of the Pannerdense Kop river bifurcation, several research questions can be posed. Basically they all come down to finding proper ways to predict the distribution of water and sediments at the bifurcation.

In its simplest way, a river bifurcation can be represented by a simple one-dimensional branch model (or network model) as illustrated in Figure 3. For these types of models the sediment-distribution at the node has to be expressed beforehand. Usually the ratio of sediment load of the two downstream branches (i.e., S_2/S_3) is expressed as some empirical power law of the discharges

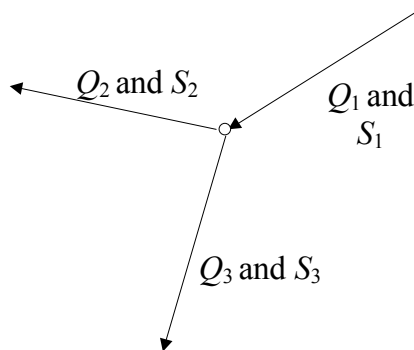


Figure 3 Simple representation of a river bifurcation by a branches model

to these branches (i.e., function of $[Q_2/Q_3]^k$) and other system parameters. It was shown for instance by Wang et al. (1995) that in this case the behaviour of the bifurcation depends sensitively on the parameters of this nodal point relation. The bifurcation may show unstable behaviour for certain (often occurring) combinations of the power k (or other coefficients) in this distribution function. Based on these analyses it was concluded that for modelling the actual behaviour of a river bifurcation, detailed knowledge had to be gathered on sediment-distribution and its impact on the river branches.

For the simple network model the need for a beforehand-prescribed distribution function implies that the predictability of such a model highly depends on the quality of this empirical function. In general these functions are poorly known, which leads to the conclusion that a two-dimensional (2-D) or three-dimensional (3-D) approach is mandatory for proper assessment. In a 2-D or 3-D model, sediments are distributed automatically according to the geometry, flow conditions and sediment characteristics at the bifurcation. Then the predictive quality of the model is expected to depend on a realistic representation of the sediment and flow interaction at the bifurcation.

At the Pannerdense Kop bifurcation the ratio of sediment towards the Waal River and towards the Pannerdens Kanaal ($S_{Waal}/S_{PK} \approx 3$) is higher than the ratio of discharges to these branches ($Q_{Waal}/Q_{PK} \approx 2.2$). Because the Pannerdens Kanaal bifurcates at the end of an outer bend of the Boven-Rijn (see figure 1) this is partially explained by the spiral flow effect in this bend which causes sediment transport near the bottom to be deflected towards the left (to the Waal river). Often, this phenomenon is called the Bulle effect, after the experiments by Bulle (1926). Furthermore it is shown later in this paper that horizontal and vertical sorting of graded sediment is another relevant parameter in the skewness of sediment distribution towards the branches.

In general the modelling-related research for the Panterdence Kop bifurcation focuses on:

- Study to determine valid and accurate empirical distribution functions for bifurcations in one-dimensional network models;
- Improvement of the two-dimensional and three-dimensional modelling techniques to realistically simulate the sediment distribution at a bifurcation.

The main target of this research is to be able to predict the (stable) morphological behaviour of a river bifurcation in the lower Rhine-River branches. Therefore the results of laboratory experiments, a field survey campaign, and mathematical modelling studies are combined in this paper.

2. LABORATORY EXPERIMENTS

In 1981 several experiments were carried out in a large-scale model at WL | Delft Hydraulics. The experiments were aiming at determining and understanding the discharge and sediment distribution at present and at modified discharge distributions. In Figure 4 a photograph shows the layout of the model (looking in upstream direction). On the background a sieving facility is shown that was built to separate different size fractions that arrived at the downstream sediment traps, and to compile the separate fractions to the correct inflow dosage and composition before re-circulation to the upstream input.

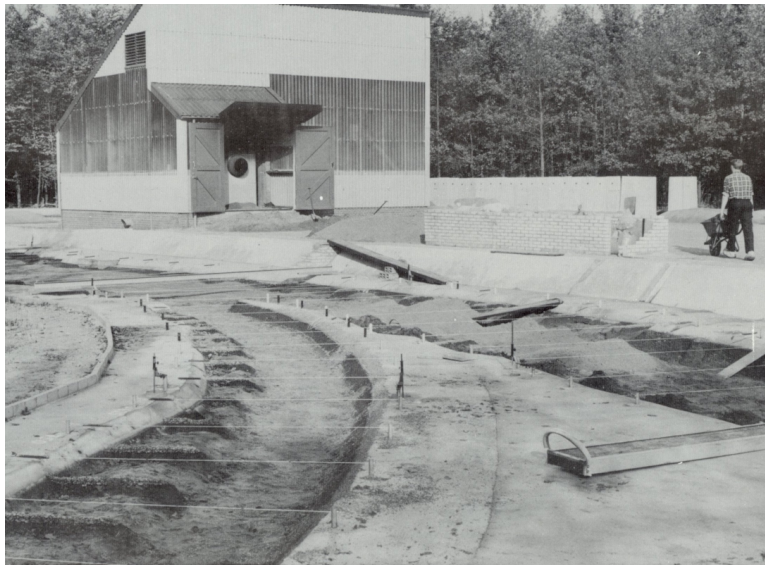


Figure 4 Outdoor scale model of Panterdence Kop river bifurcation (looking upstream) at WL | Delft Hydraulics in 1981.

For scaling, a characteristic discharge in the Boven-Rijn of $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ was chosen, which is roughly the annual mean discharge. Flood plains are not included. The following scaling was applied:

- Scale factor for length $n_L = 100$; for height $n_H = 40$; for velocity $n_u = 2.08$; for grain size $n_D = 4$; for roughness $n_C \approx 1.25$.
- A tilt for both downstream branches of $1.0 \cdot 10^{-3}$ was applied.

Several runs were carried out to calibrate bathymetry, transport rates, bed composition and hydraulic conditions in model and in prototype. It was found that for this model it was not

possible to fully reproduce both the bed-topography (situation of 1960) and sorting effects in all branches. The adjustments needed for best agreement particularly focussed on the composition of the bed and of sediment dosing. For instance, sediment dosing was given a finer composition to account for the effect that bed-composition is usually coarser than the transported material. Furthermore it was decided (on basis of tracer measurements) that the sediment composition at the upstream boundary had to be given a non-uniform distribution over the width: relatively coarse on the right and relatively fine on the left side (in agreement with prototype measurements). Although the bed composition of the Pannerdens Kanaal remained slightly too coarse, this gave a good result for bed composition of the Waal, and yielded a good reproduction of sediment-transport rates and sediment-distribution towards the branches.

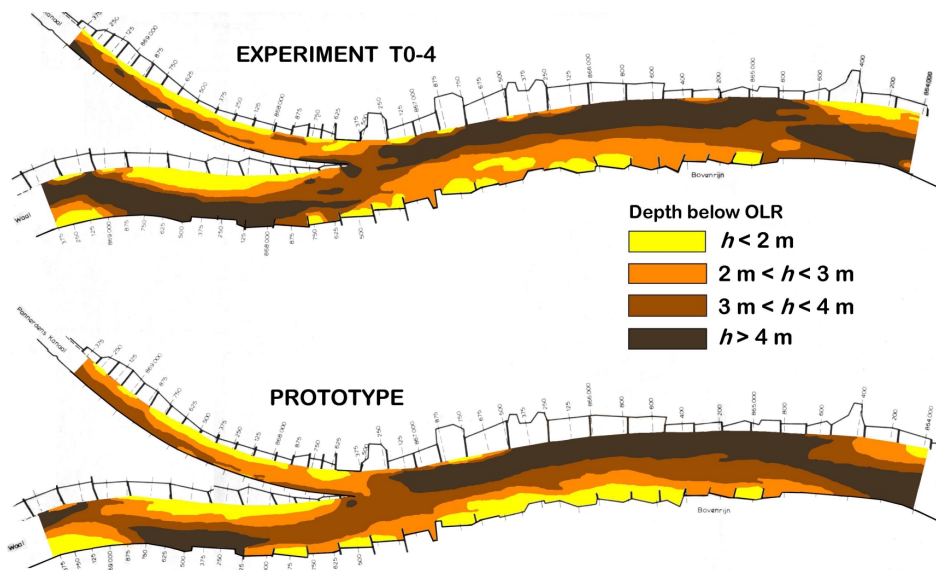


Figure 5 Comparison of resulting reference water depth (depth below design low-water level OLR of 1962) in prototype and calibrated scale model.

With respect to bed-level changes it was concluded that good agreement could be obtained for locations and magnitude of bars and pools, but that the bed-level in the Waal river remains slightly too low. This can be seen from Figure 5, which shows the measured bathymetry (which is assumed to be a dynamic equilibrium state). Here OLR is the design level for low water situations, used for shipping criteria.

The experiments have shown that notably the composition of sediment both in the bed and at the upper boundary were key-parameters in calibrating the model. The adjustments of sediment composition (notably at the upper boundary) were essential for reproducing the correct sediment-transport distribution at the bifurcation, but it was not possible to obtain the correct bed level in all branches.

3. FIELD DATA

In the period 1995 - 2000 several measuring campaigns were initiated by Rijkswaterstaat to investigate the flow and transport rates, the composition of bed and under layers, bed forms and bathymetry during normal and flood conditions. The results are discussed by Brinke et al, 2001. In 2000 the grain-size characteristics of the upper four metres of the subsoil near the bifurcation

were mapped using 102 vibro corings combined with seismic surveys along lines parallel to the river axis. These data were interpolated to a 3D database of the river bed composition covering the active transport layer (thickness less than 1 metre) and several meters of the subsoil.

The analyses of the data show that the observations can be explained through several interactions. For instance, the discharge-dependent dune-formation is an important source of vertical sorting, and that dune formation is relevant for hydraulic roughness. The very high dunes that occurred during the recent high floods of 1995 and 1998 are still visible in the bed-composition database by relatively coarse base layers that were formed below the high dunes during this flood. It is expected that these historically-formed vertical sorting patterns are relevant for future morphological changes.

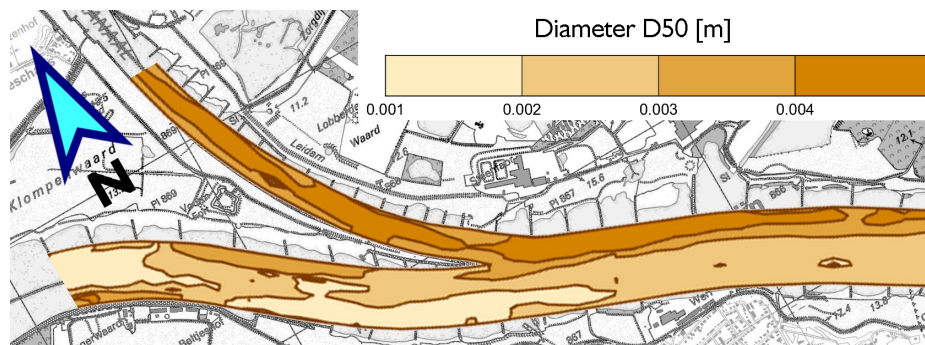


Figure 6 Median grain size in the upper 20 cm of the active transport layer according to the interpolated 3D data set of the subsoil in the study area

The map of bed-composition in figure 6 shows how on the right side of the Boven-Rijn and in the Pannerdens Kanaal (right branch) the grain size is about twice as high as on the left side and in the Waal River. This corresponds very well to the values found in the scale model, and composition imposed on the upper boundary of the scale model. It underlines the importance of accounting for this partition of sizes to understand the behaviour of sediment at the bifurcation. On basis of migration of dunes (dune-tracking) a sediment-distribution ratio was calculated during the 1998 flood of $S_{Waal}/S_{PK} \approx 7$ for bed-load transport only. This is much higher than for total-load data, indicating that the suspended-sediment transport may be relevant for morphological changes as well (Brinke et al., 2001).

4. MATHEMATICAL MODELLING

In the 1980's it was found by WL | Delft Hydraulics that it was possible to obtain a good reproduction of the bed-topography by a two-dimensional morphological model of the Pannerdense Kop. The model was applied for spatially constant sediment properties and a spatially constant Chézy roughness for each branch. Flood plains were not included, and simulations were carried out using a characteristic mean discharge of $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ assuming the bed to be in a dynamic equilibrium state.

Considering the observed spatial variations of grain size as shown in previous sections, it was decided in 1997 to repeat the simulations with the measured grain size variations. Surprisingly, it appeared no longer possible to correctly reproduce transverse bed profiles (their amplitude decreased) and the locations of crossings between consecutive bends (they moved slightly

downstream). The causes and possible solutions were analysed theoretically by Mosselman et al. (1999). It was found that this effect of spatial grain size variations can be explained from linear analyses of the mathematical model. It is also found that the effect can be counterbalanced by the effect of spatial variations in hydraulic roughness. The success of model applications using constant grain size and Chézy coefficient suggests that in the Dutch Rhine branches such counterbalancing does occur.

The analyses and laboratory- and field-observations have convinced us that a realistic prediction of as well the bed topography, as the sediment distribution, as the sediment sorting requires a model that includes the spatial variations in sediment properties and hydraulic roughness. For this reason the analyses are now focussing on application of the 2D graded-sediment module (with alluvial roughness prediction) of the Delft3D modelling system.

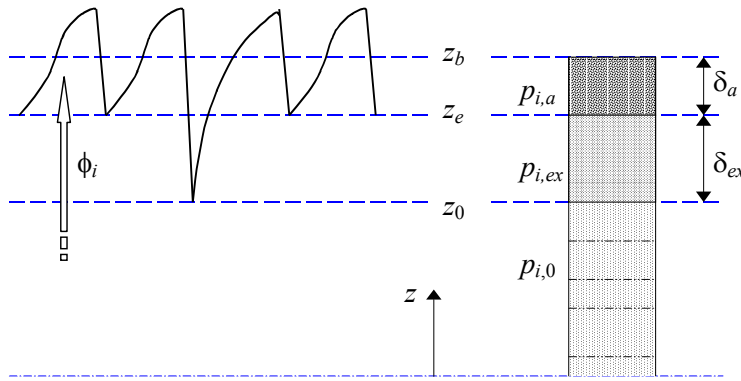


Figure 7 The bed-layer schematisation after Ribberink (1987), where subscript i is associated to sediment size fraction i

The graded-sediment module in Delft3D is based on the basic bed-layer concept of Hirano (1972) and elaborated by Ribberink (1987). The bed is subdivided into a transport layer, an exchange layer and a substratum with sub-layers (figure 7) with a bookkeeping system for substrate composition (Sloff et al., 2001). Sediment transport is computed per fraction accounting for hiding and exposure effects, using a Meyer-Peter and Müller type of formula.

In this figure p_i is the probability of a size fraction (with $\sum p_{i,a} = 1$, $\sum p_{i,ex} = 1$, $\sum p_{i,0} = 1$), z_b is the average bed level ($z_b = z_0 + \delta_{ex} + \delta_a$), and ϕ_i is the vertical sediment flux through the interface. The active layer represents the upper layer containing the material which is taking part in the actual sediment-transport process, and its thickness is generally related to the average height of bed forms (dunes, ripples).

It is well accepted that a combination of spiral flow and down-slope gravity effects is responsible for the development of typical bend profiles (deep outer bend, point bar in inner bend). It is also supposed that this is the dominating mechanism for lateral sorting (coarse outer bend, fine inner bend). Presently these effects are expressed by an extension of the direction formula for the direction of the depth-averaged sediment transport vector (originally proposed for uniform sediment by Struiksma et al, 1985), written as follows:

$$\tan(\beta_i) = \frac{\sin(\alpha) - \frac{1}{f_{si}} \frac{\partial z_b}{\partial y}}{\cos(\alpha) - \frac{1}{f_{si}} \frac{\partial z_b}{\partial x}} \quad \text{with} \quad f_{si} = A_{sh} \theta_i^{B_{sh}} \left(\frac{D_i}{h} \right)^{C_{sh}} \left(\frac{D_m}{D_i} \right)^{D_{sh}} \quad (7)$$

Here α is the direction of the drag force exerted by the fluid on the bed (include spiral flow effect), θ_i is the non-dimensional shear stress (Shields parameter), h the water depth, A_{sh} , B_{sh} , C_{sh} , D_{sh} are calibration coefficients for the bed-slope effect, D_m the mean grain size of material in the transport layer, and D_i the mean grain size of size-fraction i . If the calibration coefficients C_{sh} and D_{sh} are not taken equal to zero, they can be used to represent a bed-form effect and a type of hiding and exposure effect respectively.

From simulations with the 2D Pannerdense Kop model it is concluded that a significant improvement of numerical results can be obtained when a combination of graded-sediment and alluvial roughness is applied. The simulations are carried out on a grid with an average grid size of 100×20 m (about 1576 grid cells). For sediment transport a type of Meyer-Peter and Müller formula was used, with a hiding and exposure correction. A constant transport layer thickness about 0.2 m, and with coefficients $A_{sh}=1.4$, $B_{sh}=0.5$, $C_{sh}=0$, $D_{sh}=0$, and alluvial roughness based on Van Rijn's (1984) dune-height predictor. The simulated bed-topography of the model (equilibrium after about 20 years) is compared to the prototype in figure 8. Compared to Figure 5 (scale model results) it can be seen that the figures represent a situation with more depth in Boven-Rijn (situation 1990-2000), and that the average bed-levels in the three branches agree better than the laboratory scale model.

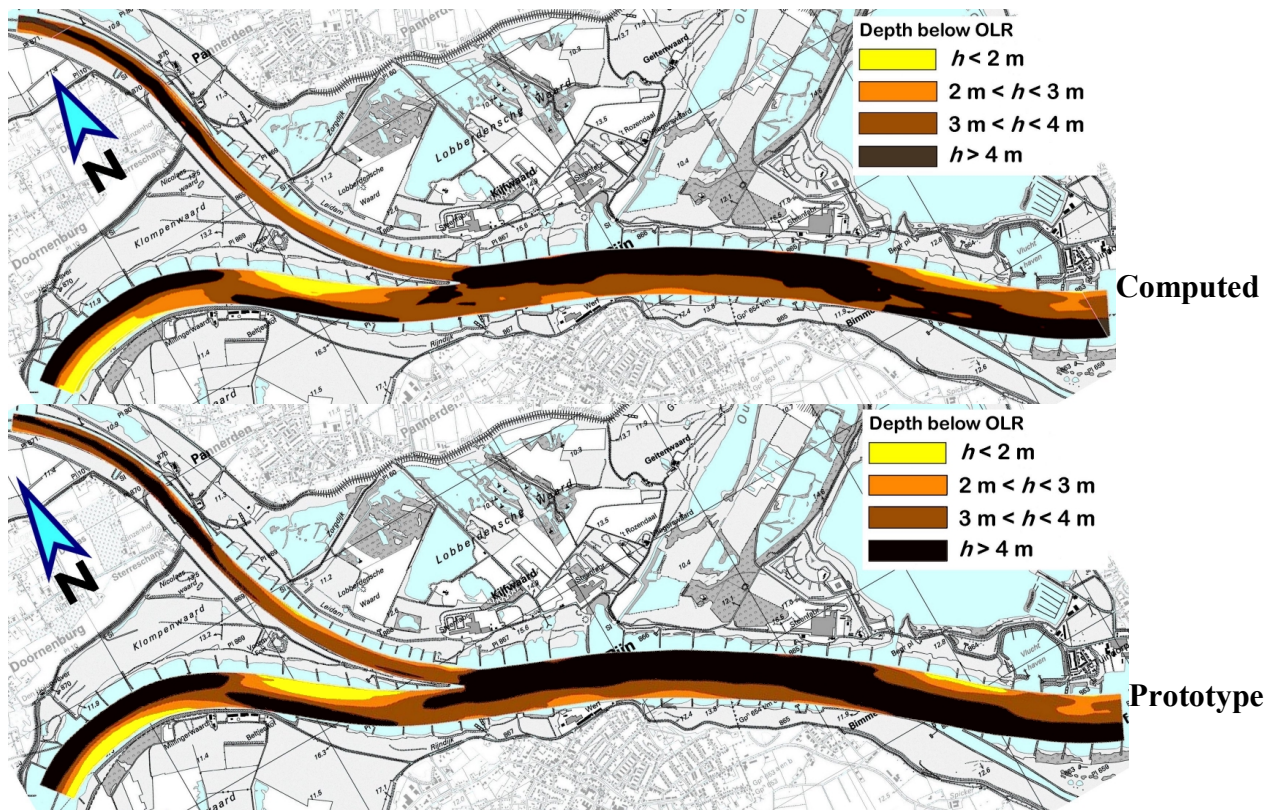


Figure 8 Bed topography of prototype (below) and simulated with Delft3D using graded sediment and alluvial roughness (above) relative to low-water design level OLR

Particularly the simulated width-averaged (1D) bed-level development appeared to be quite sensitive to variations in diameter and in roughness, which often leads to severe aggradation of the Pannerdens Kanaal. Clearly the stability of the bifurcation in the model is quite dependent on these effects. The sensitivity to parameters in the direction formula was found to be much less dominant. Furthermore it was found that when only bed roughness was varied spatially, and a constant grain size was used (non-graded or uniform sediment), the transverse bed profiles and locations of crossings could not be reproduced. This confirms the analysis of Mosselman et al. (1999). From the resulting grain size distribution it can be concluded that for grain size the crossing between two consecutive bends is located slightly downstream of actual crossing in bed topography. As shown in figure 9, the right side of the Boven-Rijn and the Pannerdens Kanaal becomes much coarser than the left side and the Waal River, corresponding to the observations as shown in figure 6.

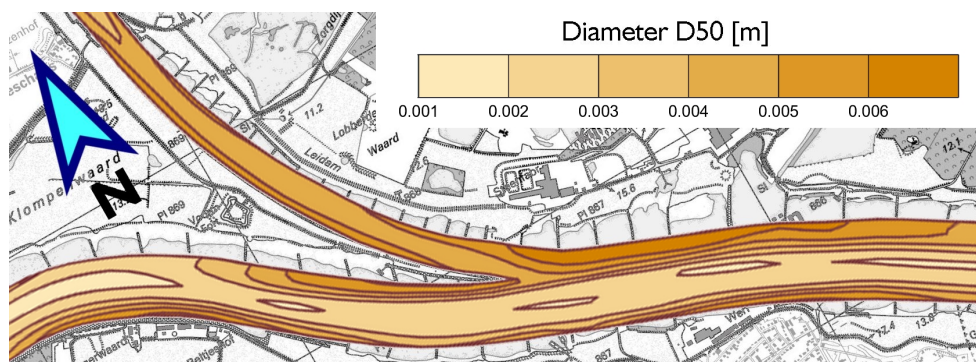


Figure 9 Simulated median grain size of active layer using graded sediment

The results of the simulations show that the initial bed composition is relevant for the final equilibrium state. Best results were obtained using the actual spatially varying bed composition data from the 3D database instead of using approximate constant initial grain sizes. Also the upper boundary appears to be affecting the distribution of sediment fractions at the bifurcation. Although the boundary is located further upstream compared to the scale model, a modification of sediment-inflow upstream directly causes a change in the ratio S_{Waal}/S_{PK} .

5. DISCUSSION

Focussing on prediction models for the stability of the river bifurcation 'Pannerdense Kop' it is concluded that at least a 2D (depth-averaged) modelling approach including spatial variations in bed composition and hydraulic roughness is needed to reproduce the observed phenomena. Furthermore it is observed that quite a strong interaction between bed-composition patterns and bed topography exists when these are developing to an equilibrium state. For the Pannerdense Kop model this apparently results in the existence of several different equilibrium states. Based on these findings it is decided to focus on further improvement of the modelling concepts for graded sediment and dynamic alluvial roughness, and theoretical analyses to the behaviour of the system. Furthermore, the prototype observations of the subsoil show the importance of discharge variations and corresponding dune-height variations for the vertical sorting processes. For this reason the application of a new vertical sorting model of Blom (2001) is under investigation, which accounts for more realistic continuous vertical sorting under dunes. Also it is clear that the direction formula for lateral sorting of sediment fractions is imperfect, and improvement is urgently needed.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The research on the Pannerdense Kop bifurcation is carried out as part of a co-operation of the members of the 'Morphological Triangle', in which certain parts are funded by Rijkswaterstaat RIZA. The authors would like to express their gratitude to Dr. A. Sieben for his support and fruitful discussions. Furthermore the contributions to the 2D modelling study of the Pannerdense Kop of Mr. A.J. Smale and Mr. P. Verhaar have guided the authors to the relevant conclusions, for which they are acknowledged as well.

LITERATURE

- Blom, A., G. Parker, and J.S. Ribberink (2001) Vertical exchange of tracers and non-uniform sediment in dune situations. Proc. 2nd IAHR Symp. on "River, Coastal and Estuarine Morphodynamics", Obihiro, Japan.
- Brinke, W.B.M. ten, S.H.L.L. Gruyters, R.L., R.L. Koomans, A.W.E. Wilbers, and M.G. Kleinhans (2001) Sediment transport and morphological processes near a river bifurcation in the Dutch Rhine. Paper Proc. 7th International Conference on Fluvial Sedimentology.
- Bulle, H. (1926) Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen. VDI Verlag, Berlin (in German).
- Hirano, M., 1972. Studies on variation and equilibrium state of a river bed composed of non-uniform material. Trans. of JSCE, Vol. 4.
- Mosselman, E., A. Sieben, C.J. Sloff and A. Wolters (1999) Effect of spatial variations on two-dimensional river bed morphology. Proc. IAHR Symposium "River, Coastal and estuarine morphodynamics", Genova, Italy, Publ: Univ. of Genova, Dept. of Environmental Engrg.
- Ribberink, J.S. (1987) Mathematical modelling of one-dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. PhD thesis, Delft. Univ. of Technology, Netherlands.
- Sloff, C.J., H.R.A. Jagers, Y. Kitamura, and P. Kitamura (2001) 2D morphodynamic modelling with graded sediment. Proc. 2nd IAHR Symp. on "River, Coastal and Estuarine Morphodynamics", Obihiro, Japan.
- Struiksma, N., Oleson, K.W., Flokstra, C. & Vriend, H.J. de, 1985. Bed deformations in alluvial channel bends. J. Hydr. Res., IAHR, Vol. 23, no. 1, p57
- Van Rijn, L.C. (1984), Sediment transport, Part III: bed forms and alluvial roughness. J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.110, No.12, pp.1733-1754.
- Wang, Z.B., R.J. Fokkink, M. de Vries, and A. Langerak (1995) Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. J. Hydr. Res, IAHR, Vol. 33, No.6, p. 739.



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

