Numerieke simulatie van hydraulische en morfodynamische processen in nevengeul/hoofdgeul-systemen

Inzicht in effecten van ontwerpparameters nevengeulen

MSc. Thesis P.K. (Nienke) Schuurman Oktober 2012



Foto op titelpagina: Nevengeul langs de Lek, ten Oosten van Schoonhoven (B. van Eyck, 1995)

Opmerking: Dit rapport is ontworpen voor dubbelzijdige kleurafdrukken

Illustraties rapport: M.H. Martens (M.H.Martens@student.utwente.nl)

Numerieke simulatie van hydraulische en morfodynamische processen in nevengeul/hoofdgeul-systemen

Inzicht in effecten van ontwerpparameters nevengeulen

SCRIPTIE

onderdeel van het behalen van de graad

MASTER OF SCIENCE

in

CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT, richting Water Management and Engineering aan de faculteit Construerende Technische Wetenschappen Universiteit Twente te Enschede

door

P.K. (Nienke) Schuurman nienschuur@hotmail.com s0147397

Afstudeercommissie: Dr. Ir. C.F. van der Mark Dr. Ir. J.S. Ribberink Dr. R.M.J. Schielen

Dr. C.J. Sloff

(Deltares) (Universiteit Twente) (Universiteit Twente) (Rijkswaterstaat) (Deltares) [Researcher/advisor] [Associate professor] [Assistant professor] [Senior advisor river management] [Specialist/ Expert advisor river engineering]

Oktober 2012

UNIVERSITEIT TWENTE.

Universiteit Twente Postbus 217 7500 AE Enschede



Deltares P.O. Box 177 2600 MH, Delft

Voorwoord

Voor u ligt mijn afsluitende werk van de studie die ik met veel plezier heb gevolgd. Dit werk was niet geweest wat het nu is zonder de hulp van een aantal mensen en de faciliteiten waarvan ik bij Deltares gebruik kon maken. Via dit voorwoord wil ik diegenen bedanken.

Allereerst wil ik mijn directe afstudeerbegeleiders bedanken. Bedankt Jan Ribberink, voor je hulp bij het zoeken naar een bij mij passend afstudeeronderwerp, de inzichten die je mij gegeven hebt vanuit je expertise, je luisterend oor en aangedragen oplossingen voor problemen waar ik tegenaan liep. Bedankt Rolien van der Mark, voor alle energie die je in mijn afstudeerproces gestoken hebt. Je bent een erg goede begeleider. Ik vond het erg fijn dat ik altijd bij je binnen mocht lopen met vragen, of deze nu met het modelleren, mijn proces of met de inhoud te maken hadden. Ik waardeer heel erg dat je zelfs vrije uren hebt opgeofferd voor het uitpluizen van foutmeldingen van het model, dat je mij nieuwe inzichten hebt gegeven, maar vooral dat je me altijd het gevoel hebt gegeven tijd voor me te hebben. Bedankt Ralph Schielen, voor je luisterend oor, het temperen van mijn werklust als mijn gezondheid daar onder leed en de inzichten die je me gaf vanuit je expertise. Bedankt Kees Sloff, voor je uitleg over modelopbouw, het regelen van een goede werkplek en de inzichten die je mij gaf vanuit je expertise.

Daarnaast wil ik Deltares bedanken voor het beschikbaar stellen van het door hun ontwikkelde numerieke softwarepakket Delft3D en het bieden van een werkplek omringt met experts. Bedankt Erik, Mohammet, Robin, Ymkje, Aukje en Menno, voor jullie expertises en interesse in mijn afstudeeronderzoek. Bedankt lieve medestudenten, voor onze inhoudelijke discussies, jullie programmeerhulp en alle gezelligheid die jullie in pauzes en buiten werktijd brachten. Jullie hebben mij echt door de perioden gesleept waarin ik minder gemotiveerd was.

Als laatst wil ik mijn familie en vrienden bedanken voor hun interesse, hulp, aanmoediging en fijne afwisseling, niet alleen gedurende mijn afstudeerperiode, maar gedurende mijn hele studieperiode. Bedankt pap en mam, voor jullie financiële support, jullie luisterend oor en de vrijheid die jullie mij gaven om mijn studietijd naar eigen wens in te vullen. Bedankt medestudenten, voor een geweldige studententijd, het samenwerken, jullie luisterend oor, de gezelligheid en tips voor het rapporteren. Bedankt huisgenootjes, dispuutsgenootjes en vrienden van over de hele wereld, voor jullie aanmoedigingen, welkome afwisselingen en jullie hulp bij mijn Engels. Bedankt Mark, voor al je energie, geduld en vertouwen.

Samenvatting

De laatste jaren worden in Nederland nevengeulen aangelegd met als doel natuur te creëren en/of de rivier meer ruimte te geven in tijden van hoogwater (bijvoorbeeld in het kader van PKB Ruimte voor de Rivier). Nevengeulen zijn waterstromen (met een lengte van honderden meters tot enkele kilometers) die min of meer parallel aan een rivier door de uiterwaarden stromen. De aanleg van een nevengeul heeft gevolgen voor de waterbeweging en morfologische processen in zowel de nevengeul, uiterwaard als de rivier zelf. De aanleiding voor dit onderzoek is drieledig. Allereerst wil Rijkswaterstaat graag advies voor de aanleg van nevengeulen om toekomstige beheer- en onderhoudsinspanningen te minimaliseren. Daarnaast is het ook vanuit de wetenschap gewenst om meer inzicht te krijgen in het effect van nevengeulen op de morfodynamiek van het geheel van geul, uiterwaard en zomerbed en de gedetailleerde processen aan de instroom en de uitstroomopening. Ten derde wil het onderzoeksinstituut Deltares weten of het mogelijk is een nevengeul te implementeren in het reeds bestaande Duurzame Vaardiepte Rijndelta-Model (DVRmodel) waarmee hydro- en morfodynamische veranderingen numeriek kunnen worden voorspeld.

Dit onderzoek heeft als doel nevengeulen te modelleren in een numeriek model en het effect te bepalen van nevengeul-ontwerpparameters op beheeren onderhoudsinspanningen ter preventie van sedimentatie/erosieproblemen. Uit een literatuurstudie blijkt dat er behoefte is aan inzicht in de morfodynamische effecten van de ontwerpparameters van nevengeulen zoals bifurcatiehoek, plek van aftakken in het kribvak, nevengeulbreedte, nevengeuldiepte en instroomdrempel. De effecten op sedimentatie en erosie zijn bepaald in een aangepast DVR-model, voor een range ontwerpparameters. Daarbij is dat de beheervan aangenomen en onderhoudsinspanningen rechtevenredig toenemen met het baggerbezwaar. Daarnaast is er inzicht verkregen in uiterwaardstroming in combinatie met een nevengeul, door een afvoergolf door te rekenen.

Ten aanzien van de ontwerpparameters hebben de modelsimulaties geleid tot het volgende inzicht. Van de vier nader onderzochte parameters hebben de keuze in bifurcatiehoek en nevengeulbreedte de meeste invloed op sedimentverplaatsing in het kader van beheer en onderhoud. Een grotere bifurcatiehoek of een kleinere breedte, leidt tot minder baggervolume. Daarnaast is gebleken dat de huidige vuistregels betreffende nevengeulafmetingen, maximale onttrekkingen of maximale sedimentatiehoogten overbodig zijn. De vuistregels over minimale vaardiepte en maximaal baggerbezwaar zijn afdoende.

Tot slot blijkt uit het onderzoek dat een representatieve stationaire afvoer voor de benadering van een afvoercurve niet bestaat. Het grootste nadeel van het modelleren met een stationaire benadering is dat het fenomeen doorspoeling niet aanwezig is. Bovendien ontbreekt bij een simulatie met een stationaire afvoer het morfodynamisch inzicht in de sedimentatie net buiten de oevers van de nevengeul.

Verder onderzoek kan zich richten op de invloed van suspensietransport, gedetailleerde 3D-berekeningen aan de in- en uitstroomopening en de numerieke methode van het model als zodanig.

Summary

In the Netherlands, in the last few years, side channels are constructed, with the aim to create nature and/or more space for a river in times of high water (e.g. in the context of PKB Room for the River). Side channels are secondary streams (up to several kilometers) which flow more or less parallel to a river through the floodplain of that river. The construction of a secondary channel has an impact on hydrodynamic and morphological processes in the secondary channel, the floodplain and the river itself. There is a threefold reason for the research. First, Rijkswaterstaat wants to obtain advice on the construction of side channels to minimize future efforts in terms of management and maintenance. It is also desirable from the science point of view to gain more insight into the effect of currents on the floodplain morphodynamics in and around secondary channels. Thirdly, the research institute Deltares wants to know whether it is possible to implement a secondary channel in the existing Duurzame Vaardiepte Rijndelta model (DVR model; Sustainable Navigation Depth for the Rhine Delta) as the DVR model is a useful tool to predict hydro-and morphodynamic changes in the Rhine branches.

This study aims to advice on modelling of secondary channels and design parameters for the construction of secondary channels, in order minimize management and maintenance efforts by preventing sedimentation/erosion problems. From a literature review it appears that there is a need to understand the morphodynamic effects of the secondary channel design parameters like bifurcation angle, the location of branching in the groyne embayment, side channel width, side channel depth, and inflow barrier. The effects on sediment movement of these four design parameters are determined in the adjusted DVR model, by modelling the extremes. It is assumed that the management and maintenance efforts are proportional with the dredging volume.

With regard to the design parameters, the model simulations resulted in four interesting insights. First, a higher discharge abstraction leads to an increase in management and maintenance efforts in terms of sediment transfer. In addition, choices in bifurcation angle and side channel width have a higher impact on the amount of dredging volume, compared to the other two modelled parameters in this research. A larger bifurcation angle or a smaller side channel width, leads to a substantially smaller amount of dredging volume. Moreover, it is shown that some of the current rules of thumb regarding secondary channel dimensions are unnecessary, namely: maximum withdrawal thresholds, and maximum sedimentation heights. The basic rules on minimum navigable depth and maximum dredging volumes are conclusive.

The study also showed that there is no best approach to model a discharge curve stationary. The two main disadvantages of modelling with a stationary approach are: the lack of understanding of the morphodynamic behaviour just outside the banks of the secondary channel, and lack of wash effects.

Further research can focus on the influence of suspended transport, detailed threedimensional model simulations from the in- and outflow location of the side channel, and the model method itself.

Inhoudsopgave

1	Inle	iding	1
	1.1.	Aanleiding	1
	1.2.	Onderzoeksdoel	3
	1.3.	Onderzoeksaanpak	3
	1.4.	Opbouw rapport	5
2	The	oretisch kader	6
	2.1.	Algemeen effect aanleg nevengeul	6
	2.2.	Bifurcatiehoek	7
	2.3.	Lengteverhouding neven-/hoofdgeul	9
	2.4.	Oriëntatiehoek	9
	2.5.	Aftakken in binnen- of buitenbocht	9
	2.6.	Bovenstroomse bocht	0
	2.7.	Onverkende gebieden 10	0
	2.8.	Afbakening1	1
3	Нур	otheses1	2
	3.1.	Verwacht effect variatie in initiële condities (ontwerpparameters)12	2
	3.2.	Verwacht effect uiterwaardstroming10	6
4	Nun	neriek model1	8
	4.1.	Modelleeraanpak1	8
	4.2.	Introductie Delft3D19	9
	4.3.	Modelopbouw19	9
	4.4.	Modelvarianten	7
5	Res	ultaten variatie in initiële condities	3
	5.1.	Hoe de figuren te lezen	4
	5.2.	Sedimentheuvel voor nevengeulingang	5
	5.3.	Algemeen effect aanleg nevengeul	6
	5.4.	Bifurcatiehoek	9
	5.5.	Plek van aftakken in het kribvak40	5
	5.6.	Breedte en diepte van de nevengeul50	0
	5.7.	Instroomdrempel	7
	5.8.	Samenvatting en interpretatie6	3
6	Res	ultaten variabele en constante afvoeren69	9
	6.1.	Hoe de figuren te lezen69	9
	6.2.	Klassenindeling69	9
	6.3.	Variabele afvoer	0
	6.4.	Constante afvoeren	6

7	Disc	ussie	83	
	7.1.	Modelbeperkingen	83	
	7.2.	Leemte in modelkennis	85	
	7.3.	Effect variatie in initiële condities (ontwerpparameters)	. 87	
	7.4.	Effect variabele en constante afvoeren	.91	
8	Con	clusie	93	
	8.1.	Nevengeulen modelleren in Duurzame Vaardiepte Rijndelta Model	93	
	8.2.	Invloed parameters op Hydro- en morfodynamiek	93	
	8.3.	Consequenties nevengeulontwerprichtlijnen	96	
9	Aan	bevelingen	.97	
	9.1.	Aanbevelingen voor nevengeulontwerp	.97	
	9.2.	Aanbevelingen voor het modelleren van nevengeulen	. 98	
	9.3.	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	.99	
Lit	Literatuur			
Bi	Bijlagen			

Symbolen

5		гı -3л
С	massaconcentratie	[kg·m ⁻³]
C _b		[Kg·m]
	zoutconcentratie	[ppt]
ctot	som van alle massaconcentraties van de sedimentfracties	$[kg \cdot 11]$
C		$[m^{1/2} \cdot s^{-1}]$
ט ת	denositieflux	$[ka \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
d	gemiddelde waterdiente	[m]
E E	erosieflux	[ka·m ⁻² ·s ⁻¹]
E E	aebruiker-aespecificeerde coefficient in hoeverre de	
23	spiraalstroming meegenomen moet worden (met als	
	systeem gekozen waarde 0, waarbij het effect van	
	spiraalstroming niet meegenomen wordt)	
f	Coriolisterm	
f(z)	verticale coordinaat	[-]
F_x	wrijvingsterm. Wanneer aangenomen is dat de	[m · s⁻²]
	horizontale lengteschaal vele malen groter is dan de	
	waterdiepte: $F_x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$. Waarbij voor kleinschalige	
	stromingen (waarbij de schuifspanning bij de oevers	
	meegenomen moet worden), de schuifspanning als volgt	
	uitgedrukt wordt: $\tau_{xx} = 2\nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y}\right), \tau_{xy} = \nu_H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \partial $	
	$\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\Big) + \Big(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\Big)\Big\}, \ \tau_{yy} = 2\nu_H\Big(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\Big)$	
F _h	Kracht door hydrostatisch drukverschil	[N]
Fr	Froudegetal	[-]
F_m	middelpuntvliedende kracht	[N]
g	zwaartekrachtversnelling ($\approx 9,81 m \cdot s^{-2}$)	[m · s⁻²]
$H = d + \zeta$	totale waterdiepte	[m]
	d gemiddelde waterstand	[m]
T	ζ afwijking van de gemiddelde waterstand	[m]
1	Intensiteit van deze spiraaistroming	[m·s -]
K _S	Nikurause ruwneidsnoogle	[111]
m		
т М	impulsterm door onttrekking of lozing van het water	[rg] [m·s ⁻²]
M_{χ}	Lozing of onttrekking leidt tot een impuls. Wanneer de	
	lozing met een hogere snelheid (\hat{U}) aan het stromende	
	water (met stroomsnelheid u) toegevoegd wordt, zal	
	deze ter plekke dus een versnelling ondervinden:	
	$M_x = q_{in}(\widehat{U} - u)$	
n	Manningcoefficient	[m ^{-1/3} ·s]
n _{fr}	aantal sedimentfracties	[-]
P	atmosferische druk $P \approx 101$	[kPa]
R_s^*	effectieve straal van de kromming van een	 [m]
-	tweedimensionale stroomlijn.	
r	straal van de bocht of kromming	[m]
S	bronterm in de continuïteitsvergelijking	[m·s⁻¹]

T t	schuifspanning die resulteert uit de spiraalstroming tijd	[N·m⁻²] [s]
\vec{U}	dieptegemiddelde stroomsnelheid	[m · s ⁻¹]
v(z)	snelheidscomponent van spiraalstroming loodrecht	[m · s ⁻¹]
	op de dieptegemiddelde stroomsnelheid	
Ws	valsnelheid/bezinksnelheid	[m·s⁻¹]
$W_{s,0}$	specifieke bezinksnelheid van de basis sedimentfractie	[m·s⁻¹]
u, v, w	snelheidscomponenten in repectievelijk x, y, z-richting	[m · s⁻¹]
x, y, z	coördinaten in de breedte-, lengte-, en hoogterichting	[m]
β_c	invloedparameter spiraalstroming, varieert tussen	[-]
	0 en 1, waarbij $\beta_c = 0$ inhoudt dat er geen invloed is van	
	spiraalstroming.	
$\mathcal{E}_{s,x}$	convectieve dispersie	[m²⋅s⁻¹]
ζ	afwijking van de gemiddelde waterdiepte	[m]
κ	Von Karmenconstante	[-]
ρ	dichtheid van water	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho_w(c_{salt})$	specifieke dichtheid van water met zoudconcentratie	[kg∙m ⁻³]
$ ho_{s,fr_i}$	specifieke dichtheid van sedimentfractie i	[kg∙m⁻³]
	dieptegemiddelde stroomrichting staat	
σ	coördinaat in de hoogterichting van het Phillips- σ -rooster	[m]
$ au_{br}$	bodemschuifspanning die loodrecht op de	[N · m⁻²]
	dieptegemiddelde stroomrichting	
$\vec{\tau}_b$	bodemschuifspanning	$[N \cdot m^{-2}]$
τ _{cr,e}	kritische erosieschuifspanning (gedefinieerd door	$[N \cdot m^{-2}]$
	de gebruiker)	
$\tau_{cr,d}$	kritische depositieschuifspanning (gedefinieerd door	[N·m⁻²]
	de gebruiker)	

1 Inleiding

Dit rapport is opgesteld in het kader van een *master* thesis voor de opleiding *Civil Engineering and Management* aan de Universiteit Twente. Deze opdracht is uitgevoerd bij de afdeling *Rivierkunde en transport over water*, onderdeel van de unit *Zoetwatersystemen*, van het onafhankelijk toegepast kennisinstituut Deltares te Delft en begeleid door de afdeling *Water Engineering and Management* van de Universiteit Twente.

1.1. Aanleiding

De aanleiding voor het onderzoek is drieledig. Allereerst wil Rijkswaterstaat graag advies voor de aanleg van nevengeulen om toekomstige beheer- en onderhoudsinspanningen te minimaliseren. Daarnaast is het gewenst om meer inzicht te krijgen in het effect van uiterwaardstromingen op de morfodynamiek in en rond nevengeulen. De derde vraag komt vanuit Deltares. Zij wil graag weten of het mogelijk is een nevengeul te implementeren in het reeds bestaande Duurzame Vaardiepte Rijndelta-model (DVR-model).

Nevengeulen (lengte van enkele kilometers) zijn waterstromen die min of meer parallel aan de hoofdstroom van de rivier (door de uiterwaarden) stromen. Nevengeulen staan aan het begin en eind in verbinding met de rivier zelf, waardoor ze meestromen met de rivier. In vaktermen (Figuur 1-1) spreekt men van een moedergeul op de plek waar de rivier nog niet vertakt is, noemt men de semiparallelle stroming de nevengeul en heet de rivier ter hoogte van de nevengeul een hoofdgeul.



Figuur 1-1. Visuele weergave begrippen moedergeul, hoofdgeul en nevengeul.

Bij het aanleggen van nevengeulen wordt getracht de beheer- en onderhoudsinspanning te minimaliseren zonder dat dit ten koste gaat van de primaire functie van de nevengeul (rivierverruiming, ruimtelijke kwaliteit, scheepvaart en ecologie). Harde ontwerpregels kunnen nog niet worden opgesteld door gebrek aan morfodynamische kennis. Voor het ontwerp en de aanleg van een nevengeul worden daarom een aantal vuistregels aangehouden (Tabel 1-1).

Parameter	Waarde
Stroomsnelheid nevengeul [bron 1]	0,1 – 1 m/s (richtlijn 0.3 m/s)
Gemiddelde sedimentatiesnelheid hoofdgeul [bron 1]	1 - 2 cm/jaar
Baggerfrequentie nevengeul [bron 1]	5 - 10 keer/jaar
Afstand nevengeul tot hoogwaterkeringen [bron 2]	50 – 100 m
Dwars-stroomsnelheden hoofdgeul [bron 2]	< 0.3 m/s bij volle nevengeul < 0,15 m/s bij meestromend winterbed
Minimale waterdiepte hoofdgeul [bron 2]	1,4 * Overeengekomen Laagste Rivierpeil [m]
Debietonttrekking van hoofdgeul door nevengeul [bron 2]	< 3 % van zomerbedafvoer hoofdgeul
Baggerhinder hoofdgeul [bron 2]	5 dagen/jaar voor riviertraject van 15 km ¹
Sedimentatie hoofdgeul [bron 3]	maximale 0,2 meters totaal
Diepte nevengeul [bron 3], [bron 5]	0,5 - 4 m
Talud in nevengeul [bron 3]	> 1:10
Locatie van nevengeul in het winterbed [bron 3], [bron 4]	Aftakken in buitenbocht Benedenstrooms in het kribvak Zo recht mogelijke geul
Afstand nevengeul tot bandijk (winterdijk) [bron 3]	~100 m
Bifurcatiehoek [bron 3]	Hoe groter de hoek, hoe beter [°]
Shieldsparameter nevengeul [bron 4]	< 0,03
Afstand nevengeul tot kribwortel [bron 4]	50 m
Meestroomfrequentie nevengeul [bron 4]	9 maanden/jaar
Breedte nevengeul [bron 5]	• Waal: 80 - 150 m; • Rijn: 50 - 100 m; • Maas: 50 - 100 m; • IJssel: 40 - 80 m

Tabel 1-1. Vuistregels voor het ontwerp van nevengeulen.

Bron: [1] Handreiking sedimentbeheer nevengeulen(Rijkswaterstaat, 2010); [2] Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren (Kroekenstoel, 2009); [3] Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden (Wolters, Platteeuw, & Schoor, 2001); [4] Leidraad Rivieren (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007); [5] Cyclisch beheer in uiterwaarden (Peters, Kater, & Geerling, 2006).

In *Handreiking sedimentbeheer nevengeulen* (Rijkswaterstaat, 2010) beschrijft Rijkswaterstaat de keuze om aanzanding bij voorkeur in de hoofdgeul plaats te laten vinden. Hiervoor zijn een drietal redenen. Ten eerste wordt de ecologische ontwikkeling in nevengeulen verstoord als daar het baggerwerk plaatsvindt. Ten tweede zal de aanzanding in de hoofdgeul slechts één a twee decimeter zijn wanneer de nevengeul afvoer een paar procent van het totale debiet bedraagt. Hierdoor hoeft de aanzanding in de hoofdgeul niet per se een knelpunt met de scheepvaart op te leveren. Ten derde is de hoofdgeul beter bereikbaar voor baggermateriaal en kunnen de baggerwerkzaamheden van de hoofdgeul kosteneffectief worden meegenomen in het regulier baggeronderhoudsprogramma.

Er zijn een aantal conflicterende ontwerpprincipes voor nevengeulen, afhankelijk van het uitgangspunt. In *Leidraad Rivieren* (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) staat een overzicht van deze conflicterende principes (Tabel 1-2).

Ontwerp	Veiligheid	Scheepvaart	Natuur
Locatie inlaat	t.a.v. aanleg: binnenbocht, t.a.v. beheer: buitenbocht (minder sediment naar geul)	-	-
Bodemhoogte geul	>1m waterdiepte bij mediane waterstand	-	<1m waterdiepte bij mediane waterstand
Oevertalud	Steiler dan 1:7 (beperking vertragingsverliezen)	-	Flauwer dan 1:10
Shields-parameter	-	<0,03	>0,05

Tabel 1-2. Conflicterende ontwerpprincipes bij nevengeulen (directe kopie uit Leidraad Rivieren) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007)

¹ De maximaal toegelaten hinder voor de scheepvaart bedraagt 5 dagen per jaar in een riviertraject van 15 km. Met modern materieel is het mogelijk om in die periode totaal 12.500 a 15.000 m³ sediment te baggeren op de Waal.

1.2. Onderzoeksdoel

Dit onderzoek heeft als doel nevengeulen te modelleren in een numeriek model en het effect te bepalen van nevengeul-ontwerpparameters op beheer- en onderhoudsinspanningen ter preventie van sedimentatie/erosieproblemen. Dit gebeurt op basis van uitkomsten van eerder gedaan onderzoek en nieuw verkregen inzichten met behulp van het programma Delft3D. De plekken waar sedimentatie en erosie niet gewenst zijn, volgen uit de eisen en wensen van de functies scheepvaart en veiligheid.

1.3. Onderzoeksaanpak

Het doel is opgesplitst in twee subdoelen. Het eerste is de effectbepaling van nevengeul-ontwerpparameters op hydro- en morfodynamica. Het tweede is het bepalen welke constante afvoer het beste de morfodynamiek in de nevengeul representeert die optreedt bij het modelleren met een variabele afvoer. Er is gekozen om een bestaand Delft3D-model uit te breiden voor dit onderzoek. Meer informatie hierover is te vinden in §1.3.2.

Om het eerste onderzoeksdoel te bereiken is aan de hand van een literatuurstudie een selectie gemaakt van potentieel invloed hebbende ontwerpparameters. Aan de hand van deze literatuurstudie zijn tevens hypotheses opgesteld van het effect van de geselecteerde parameters op de hydro- en morfodynamiek. Inzicht in de invloed van deze parameters is vervolgens verkregen met behulp van het programma Delft3D, waarin de geselecteerde ontwerpparameters één voor één zijn geanalyseerd. De sedimentatie en erosie die op ongewenste plekken plaatsvindt, is vertaald naar beheer- en onderhoudsinspanning. Het is immers wenselijk om deze inspanningen te minimaliseren. Bij deze vertaalslag is aangenomen dat de beheeren onderhoudsinspanningen evenredig toenemen met de hoeveelheid sediment die moet worden verplaatst.

Om het tweede onderzoeksdoel te bereiken zijn acht modellen opgesteld met een verschillend constant debiet en is een model opgesteld met een variabel debietverloop. Allereerst zijn de modelresultaten van de simulatie met de variabele afvoer vergeleken met een opgestelde hypothese. Vervolgens is de modelsimulatie met de variabele afvoer vergeleken met de stationaire modelsimulaties. Deze vergelijking geeft inzicht in de beste stationaire benadering (het representatieve debiet) van een afvoerhydrograaf.

1.3.1. Afbakening

Aansluitend bij de adviezen van voorgaande studies is gekozen om de focus voor het eerste doel in dit afstudeeronderzoek te leggen op vijf initiële conditieparameters (ontwerpparameters) en de modelafvoer (bovenstrooms opgelegde randvoorwaarde). In voorgaande onderzoeken is gekozen om een constant debiet als instroomrandvoorwaarde op te leggen. In dit onderzoek is een variabele afvoer als instroomrandvoorwaarde vergeleken met een constante afvoer als instroomrandvoorwaarde. Dit geeft mede inzicht in de effecten van uiterwaardstroming op de morfodynamiek.

De ontwerpparameters voor nevengeulen die uit eerder gedaan onderzoek² naar voren kwamen als (potentiële) invloedhebbende parameters op de sedimenthuishouding in nevengeulsystemen zijn:

- Bifurcatiehoek (Figuur 1-2);
- Breedte van de nevengeul;
- Diepte van de nevengeul;
- Plaats van aftakking in kribvak;
- Instroomdrempel van de nevengeul.

Voor verdere onderbouwing van de keuze voor deze focus wordt verwezen naar hoofdstuk 2 *Theoretisch kader*.



Figuur 1-2. De lengteverhouding tussen de nevengeul en de hoofdgeul (L2/L1) is mede afhankelijk van de bifurcatiehoek (θ_b). De rivier stroomt van rechtsonder naar linksboven.

1.3.2. Het Duurzame Vaardiepte Rijndelta-model

Voor het modelleren van een nevengeulsysteem in Delft3D is het Duurzame Vaardiepte Rijndelta-model (DVR-model) als uitgangspunt gebruikt. Hiermee is inzicht gekregen in de hydro- en morfodynamische processen in moeder-, hoofd- en nevengeul. Morfologische berekeningen ten behoeve van de scheepvaart, beheer en inrichting van de Nederlandse rivieren worden bij Deltares vaak gedaan met het DVR-model. In dit model wordt echter alleen gekeken naar de hoofdgeul (het zijn immers berekeningen voor de scheepvaart) en nevengeulen worden geschematiseerd als een onttrekking/toevoeging van debiet. Een voordeel van het aanpassen van het DVR-model is de sterkere relatie met de werkelijkheid; gevonden effecten kunnen later ter controle in de werkelijkheid worden waargenomen. Daarnaast is het gelijk een test of een nevengeulsysteem goed kan worden gemodelleerd in het huidige DVR-model. De vertaalslag van de gevonden veranderingen in sedimentatie en erosie is hierbij echter een extra stap: er moet steeds naar het verschil worden gekeken tussen de referentiesituatie en de situatie waarbij één ontwerpparameter wordt gevarieerd.

 $^{^2}$ Belangrijke bronnen zijn: Mosselman (2002); Kleinhans, Jagers, Mosselman en Sloff (2008); en Van Putten (2011).

Een alternatief was het opzetten van een nieuw model. Een voordeel hiervan is dat het model dan puur een nevengeulsysteem bevat is, waardoor de processen makkelijker kunnen worden geïsoleerd. Op deze manier kunnen gevonden processen direct worden verklaard door de variatie in één ontwerpparameter. Doordat een aanpassing/uitbreiding van het DVR-model ook inzichten geeft in de uitbreiding van het model en de mogelijkheid biedt om controlemetingen uit te voeren in de toekomst, is gekozen om het DVR-model als uitgangspunt te nemen voor deze studie.

1.4. Opbouw rapport

De eindresultaten van dit onderzoek, aanbevelingen voor nevengeulontwerp, zijn terug te vinden in hoofdstuk 9 *Aanbevelingen*. Dit advies is, zoals eerder benoemd, gebaseerd op het vergelijken van de effecten van variatie in ontwerpparameters op hydro- en morfodynamische veranderingen. De diverse ontwerpparameters zijn gekozen middels een literatuurstudie. De onderbouwing hiervoor is te vinden in hoofdstuk 2 *Theoretisch kader*. De theorie levert ook diverse verwachtingen, welke zijn getest met behulp van het model. Deze verwachtingen zijn te vinden in hoofdstuk 0 *Hypotheses*. Hoofdstuk 4 *Numeriek model* presenteert het model, zowel de fysieke locatie, als de opbouw en diverse randvoorwaarden. In de hoofdstukken 0 en 6 worden de resultaten van de diverse simulaties in het model besproken. Hoofdstuk 7 geeft vervolgens een discussie van deze resultaten en de huidige wetenschappelijke kennis. Tot slot worden in hoofdstuk 8 de conclusies besproken.

2 Theoretisch kader

Dit hoofdstuk geeft inzicht in de keuze voor de focus binnen dit afstudeeronderzoek. Deze keuze is gebaseerd op eerder gedaan onderzoek. Onderzoeken naar hydro- en morfodynamische processen in nevengeulen zijn enkel in de laatste jaren gedaan. Resultaten uit onderzoeken naar hydro- en morfodynamische processen in riviersplitsingen geven echter ook inzicht in hydro- en morfodynamische processen in nevengeulen.

Eerst wordt het algemene effect van de aanleg van een nevegeul besproken (§2.1). Vervolgens worden de bekende effecten van verschillende nevengeulontwerpparameters op de hydro- en morfodynamiek besproken (§2.2 - §2.6). Vervolgens zijn de onduidelijkheden in de hydro- en morfodynamische processen genoemd (§2.7). De laatste paragraaf (§2.8)bevat de daaruit volgende afbakening voor dit onderzoek.

2.1. Algemeen effect aanleg nevengeul

Eerst wordt het secundaire effect besproken dat optreedt door de wateronttrekking van een nevengeul. Vervolgens wordt kort ingegaan op alternerende banken.

2.1.1. Secundair effect wateronttrekking door de nevengeul

Het hoofddoel van het plaatsen van een nevengeul is vaak waterstandverlaging in de rivier. Echter, op de lange termijn zou een nevengeul juist kunnen leiden tot waterstandverhoging in de rivier (Ribberink, 2010)(Van Putten, 2011). Dit komt door een verlaging van de stroomsnelheid in de hoofdgeul ten gevolge van de onttrekking van water door de nevengeul. In het evenwichtsresultaat dat uiteindelijk ontstaat, is zowel de bodemligging als het verhang in de waterlijn veranderd ten opzichte van de situatie waarbij geen nevengeul aanwezig was. Hierdoor kan ook het waterniveau stijgen tot boven de oorspronkelijke hoogte (Figuur 2-1). Naast water kan er ook sediment de nevengeul instromen. Hierdoor zal de sedimentatie in de hoofdgeul afgezwakt worden.



Figuur 2-1. Zijaanzicht hoofdgeul bij nevengeulingreep. Hydraulische en morfologische evenwichtssituatie in de hoofdgeul na aanleg van een nevengeul, naar Ribberink (2010). Hierbij is aangenomen dat de rivier uitmondt in een meer met constante waterstand, dat er sprake is van een uniforme stroming en er geen sediment richting de nevengeul getransporteerd wordt.

2.1.2. Neren

In zijn onderzoek naar het effect van de bifurcatiehoek van een rivieraftakking (θ_b ; Figuur 1-2) op de verdeling van het water en sediment, observeerde Bulle op drie plekken rondom een splitsingspunt neren (draaikolken). Deze neren hebben een verticale as en ontstaan bij (Figuur 2-2):

- De bovenstroomse oever van de nevengeul. Begint bij de oeverknik, bij bodem kleiner dan bij wateroppervlak; [neer 1]
- De splitsingkop (afwisselend in hoofd- en zijtak); [neer 2]
- De oever van de hoofdstroom tegenover de splitsingskop.³ [neer 3]



Figuur 2-2. Locatie neren bij riviersplitsingen volgens Bulle (1926).

2.1.3. Alternerende banken

Van Putten (2011) concludeert dat de aanleg van een nevengeul leidt tot het ontstaan van alternerende banken in de hoofdgeul, benedenstrooms van de nevengeul. Deze banken migreren verder stroomafwaarts, waarna na enkele jaren vaste banken worden ontwikkeld. Daarnaast concludeerde Van Putten (2011) dat er direct na aanleg in de hoofdgeul een erosiekuil ontstaat, benedenstrooms van de nevengeul. Deze kuil blijft ongeveer één jaar liggen, waarna deze benedenstrooms migreert.

2.2. Bifurcatiehoek

Achtereenvolgens wordt het effect van de bifurcatiehoek op de waterverdeling en sedimentverdeling besproken tussen riviersplitsingen.

2.2.1. Waterverdeling en -verhang

Bulle (1926) concludeerde op basis van experimenten (zie bijlage A) dat er verschillende hydro- en morfodynamische effecten zijn bij rivieraftakkingen (θ_b ; Figuur 1-2).Bij zijn proeven zag Bulle duidelijk dat er een dwarsverhang aanwezig was bij de aftakking, waarbij het waterniveau in de binnenbocht lager staat dan in de buitenbocht. Dit verval in dwarsrichting neemt toe bij een grotere bifurcatiehoek. Echter, wanneer er naar verhouding meer water wordt afgevoerd door de hoofdgeul (wat meestal het geval zal zijn), neemt het verval in dwarsverhang af en kan zelfs verdwijnen. Daarnaast observeerde Bulle (1926) dat de waterspiegel over een korte

 $^{^3}$ Wanneer de verhouding $Q_{\text{hoofdgeul}}/Q_{\text{nevegeul}}$ toeneemt, kan deze neer verdwijnen.

afstand sterk stijgt aan het begin van de hoofdgeul, deze plotselinge stijging is niet aanwezig in de aftakking. Ook merkt Bulle op dat het verhang van de waterlijn in langsrichting kleiner is dan het verhang van de bodem. Hij concludeerde dat er minder water nabij de bodem wordt afgevoerd door de aftakking bij een toename van θ_b van 30° naar 90° en een afname van θ_b van 150° naar 90° (Bulle, Untersuchungen über die geschiebeableitung bei der spaltung von wasserläufen, 1926). Onder dezelfde condities wordt [neer 1] Figuur 2-2 breder en korter.

2.2.2. Spiraalstroming en sedimentverdeling

Bij een bodemtransport gedomineerde rivier wordt door spiraalstroming (zie bijlage B3) relatief meer sediment richting de aftakking getransporteerd en vindt er aanzanding plaats in de binnenboch van het aftakkende deel (Bulle, 1926). De spiraalstroming (Bijlage B3) resulteert in een stroming vlak bij de bodem die de zijrivier instroomt en de waterdeeltjes bij het wateroppervlak die verder in de hoofdgeul stromen (Figuur 2-3). Doordat het grovere sedimenttransport als bodemtransport wordt getransporteerd, zal het grovere sediment meegevoerd worden in de nevengeul, terwijl het zwevend sediment in de hogere waterlaag zal doorstromen in de hoofdgeul zelf (Figuur 2-4). Bij een afname van de bifurcatiehoek gaat er relatief meer sediment naar de nevengeul.



Figuur 2-3. Bovenaanzicht effect spiraalstroming bij riviersplitsing, geobserveerd door Bulle; door de spiraalstroming die is opgewekt bij de aftakking is de waterbeweging nabij de bodem richting de nevengeul en nabij de waterspiegel richting de hoofdgeul gericht.

Dit laatste resultaat wordt tegengesproken door Mosselman (2002) en Gerritsen en Schropp (2010). Beide onderzoeken concluderen een snellere aanzanding bij een grotere bifurcatiehoek (Figuur 1-2). Tot slot geeft ook Van Putten (2011) aan dat de bifurcatiehoek grote invloed heeft op het morfodynamisch gedrag van een nevengeul.



Figuur 2-4. Doorsnede effect spiraalstroming bij riviersplitsing, geobserveerd door Bulle; door circulatiestroming (opgewekt door de bocht die de nevengeul met de moedergeul maakt) komt het grovere sediment in de nevengeul terecht. De rivier stroomt 'het papier in'.

2.3. Lengteverhouding neven-/hoofdgeul

In het onderzoek naar morfologische ontwikkelingen in nevengeulen kwam naar voren dat de lengteverhouding tussen de nevengeul en de hoofdgeul (L_2/L_1) invloed heeft op de sedimentatie in de nevengeul (Mosselman, Morphological development of side channels, 2002). Hij concludeerde dat de snelheid van dichtslibbing versterkt zal worden door een lengteverhouding die groter is dan 1.5.

2.4. Oriëntatiehoek

Een oriëntatiehoek (θ_o ; Figuur 2-5) is de gemiddelde hoek tussen de nevengeul en de stroomrichting over de uiterwaarden. Wanneer deze 45° of groter is zal dit leiden tot aanzanding van de nevengeul (Mosselman, Morphological development of side channels, 2002).



Figuur 2-5. De oriëntatiehoek (θ_0).

Klop (2009) heeft diverse conclusies getrokken een eendimensionaal model van een nevengeul in SOBEK⁴. Enkele van die conclusies zijn twijfelachtig, omdat hij een sedimentverdeling oplegde die afhankelijk was van het debiet. Het is immers te verwachten, bij een bodemtransport gedomineerde rivier, dat er minder sediment naar de nevengeul getransporteerd wordt wanneer de instroom hoger ligt ten opzichte van de bodem van de hoofdgeul. Klop (2009) trekt wel een belangrijke conclusie betreffende de oriëntatiehoek: in het geval dat de uiterwaarden (winterbed) ook mee stromen zal er sprake zijn van een hogere transportcapaciteit door de nevengeul bij een kleinere oriëntatiehoek. Dit kan leiden tot erosie of een kleinere hoeveelheid sedimentatie.

2.5. Aftakken in binnen- of buitenbocht

Kleinhans, Jagers, Mosselman en Sloff (2008) concluderen dat de voorkeur om een rivieraftakking af te laten splitsen in de binnen- of buitenbocht van de rivier volledig af hangt van de doelstelling van de nevengeul. De optimale plek van aftakken is tegenstrijdig voor de functies 'sediment onttrekking' en 'debietonttrekking'. Waarbij bijvoorbeeld de keuze voor een aftakking in de buitenbocht een voorkeur kan hebben bij het doel om zo min mogelijk sediment in de nevengeul te krijgen.

⁴ Een geïntegreerd één- en tweedimensionaal modelleringprogramma (www.sobek.nl) voor overstromingsvoorspellingen, optimalisatie van drainagesystemen, riool ontwerpen, rivier morfologie en oppervlakte waterkwaliteit. Ontwikkeld door Delft Hydraulics.

2.6. Bovenstroomse bocht

In het kader van Ruimte voor de Rivier (RvR) onderzocht Van Putten (2011) het morfologisch gedrag van nevengeulen in een tweedimensionaal model, gemodelleerd met Delft3D. In tegenstelling tot het model opgezet door Klop (2009) neemt het model van Van Putten de geometrische en fysische kenmerken mee om de verdeling van sediment en debiet over beide geulen te bepalen. Het model is dus niet gebaseerd op een splitsingpuntrelatie. Daardoor representeren de resultaten de werkelijkheid beter. Uit het onderzoek van Van Putten (2009) blijkt dat onder andere de parameter 'bovenstroomse bocht' invloed heeft op het morfologisch gedrag van de nevengeul. De bovenstroomse bocht is gelegen in de hoofdstroom van de rivier, bovenstroomse bocht als de straal hebben invloed op het morfoloynamische gedrag van de nevengeul.

In het model waarbij de nevengeul is gesitueerd na een bocht onderscheidt Van Putten (2009) twee situaties (Figuur 2-6): 1) de situatie dat de nevengeul aan dezelfde oever is gelegen als de buitenbocht van de daarvoor gelegen bocht; 2) dat de nevengeul juist aan de andere oever gesitueerd is. In het eerste geval zorgt een bocht met een kleinere straal voor minder sedimenttransport richting de nevengeul dan een bocht met een grotere straal. Bij de tweede situatie is dit precies andersom (Van Putten, 2011).



Figuur 2-6. Modelsituaties Van Putten (2009) bovenstroomse bocht. Links: situatie 1; Rechts: situatie 2.

2.7. Onverkende gebieden

Schoor, Greijdanus, Geerling, Van Kouwen en Postma (2011) geven in '*een nevengeul vol leven'* aan dat de inrichting en het beheer van nevengeulen een leerproces is. Uit de paragraaf 1.1 (Aanleiding) blijkt dat er nog een aantal onzekerheden zitten in de huidige vuistregels voor de aanleg van nevengeulen. Deze paragraaf gaat kort in op de ontwerpparameters waarvoor nog behoefte is aan meer inzicht in hun effect op de hydro- en morfodynamiek in zowel de nevengeul als de bijbehorende hoofdgeul. Deze paragraaf is hiermee een opstap naar de afbakening van dit onderzoek in de paragraaf hierna.

Kleinhans, Jagers, Mosselman en Sloff (2008) tonen aan dat de sediment- en waterverdeling bij een splitsing afhangt van meer factoren dan enkel de oriëntatie van de nevengeul (zoals eerder genoemd). Deze factoren kunnen leiden tot meer (of minder) sedimentaanvoer richting de nevengeul en zelfs tot sedimentatie (of erosie).

De andere factoren die invloed hebben op de sediment- en waterverdeling bij splitsingen volgens Kleinhans et al. (2008) zijn:

- de afmetingen van de twee geulen;
- de lengteverhouding van de neven- en hoofdgeul;
- de breedte/diepte verhouding van het bovenstrooms gelegen deel van de rivier⁵;
- sedimentsamenstelling (verschillende korrelgroottes);
- lokale oeveronregelmatigheden;
- oevererosie;
- zandbanken benedenstrooms van de splitsing.

Het meest recente onderzoek naar effecten van nevengeuldimensies is gedaan door Van Putten (2011). Zoals in de vorige paragraaf besproken bleek uit zijn analyse dat de bifurcatiehoek en de bovenstroomse bocht een redelijke invloed bleken te hebben op de morfodynamiek in de neven- en hoofdgeul. Hij concludeert daarnaast dat de parameters voor spiraalstroming, dwarshellingeffecten, en de sedimentgrootte het morfologisch gedrag van nevengeulen in mindere mate beïnvloeden. Van Putten beveelt, voor verder onderzoek, aan om te kijken naar de effecten van kribben, een vaste bodem bij de in- en/of uitstroomopening, cohesieve nevengeulbodem, sedimentvang, realistisch dwarsverhang, de breedte en lengte van de nevengeul, wrijving, het effect van breedte/diepte-verhouding bij bovenstroomse bochten, de locatie van de instroomopening en de invloed van variabele afvoer (waarbij ook uiterwaardstroming optreden).

2.8. Afbakening

Aansluitend bij de adviezen van voorgaande studies is gekozen om de focus in dit afstudeeronderzoek te leggen op vijf initiële conditieparameters (ontwerpparameters) en een instroomrandvoorwaarde debiet. De vijf ontwerpparameters waar de focus op zal liggen zijn:

- Bifurcatiehoek: Er blijkt in voorgaand onderzoek een duidelijke behoefte te zijn aan inzicht van het effect van de bifurcatiehoek. Gezien Van Putten een maximale hoek van 16,66° kon creëren, liggen hier nog mogelijkheden tot nieuw inzicht;
- Breedte van nevengeul;
- Diepte van nevengeul;
- Plaats van aftakking in kribvak;
- Instroomdrempel.

Naast de vier initiële (ontwerpparameter) condities, zal er ook worden gekeken naar het effect van de instroomrandvoorwaarde in het model. De combinatie van een tweedimensionaal nevengeulmodel met een variabele afvoer is namelijk nog nooit bekeken. De interesse gaat hierbij vooral uit naar het effect van de uiterwaard die tijdelijk mee zal gaan stromen.

 $^{^5}$ Bepaalt sterk het bodemvormpatroon en dynamiek bij het splitsingspunt zelf (dit kan leiden tot instabiele zandbanken en oeveruitdieping.

3 Hypotheses

Dit hoofdstuk presenteert hypotheses over de effecten van vijf gekozen ontwerpparameters (initiële condities) en de effecten van een variabel debiet (instroom randvoorwaarde). De hypotheses zijn gebaseerd op de natuurlijke processen, de huidige ontwerprichtlijnen en de huidige kennis over de effecten van de ontwerpparameters op erosie en sedimentatie. De modelresultaten die verkregen zijn met het tweedimensionaal model (H5 en H6), zijn in hoofdstuk 7 (discussie) vergeleken met de hypotheses uit dit hoofdstuk. Hierbij is voorzichtigheid geboden, doordat het gebruikte model beperkingen heeft en daardoor niet alle processen gemodelleerd kunnen worden (§*7.1 Modelbeperkingen*). Meer informatie over modelvarianten en modelopzet kan gevonden worden in het volgende hoofdstuk (H4).

Dit hoofdstuk bestaat uit twee paragrafen. In de eerste paragraaf zijn de hypotheses gepresenteerd met betrekking tot variatie in ontwerpparameters. De tweede paragraaf bevat de hypothese over hydro- en morfodynamische veranderingen wanneer wordt gerekend met een variabel debiet.

3.1. Verwacht effect variatie in initiële condities (ontwerpparameters)

Binnen dit onderzoek is enkel gekeken naar de effecten van de volgende initiële condities van de nevengeul: bifurcatiehoek, aftaklocatie in het kribvak, breedte van de nevengeul, diepte van de nevengeul en instroomdrempel. Deze paragraaf geeft per ontwerpparameter is weer wat de verwachte effecten zijn.

3.1.1. Bifurcatiehoek

Wanneer een nevengeul aftakt van een rivier is er sprake van verdelingsprocessen tussen de hoofd- en nevengeul. Hierbij speelt de bifurcatiehoek een belangrijke rol. Wanneer het sediment evenredig is verdeeld over de waterkolom zal de sedimentverdeling over hoofd- en nevengeul gelijk zijn aan de waterverdeling. Echter, in de Nederlandse rivieren is de concentratie grover sediment groter bij de bodem. Hierdoor is de verdeling van sediment over hoofd- en nevengeul anders dan die van het water.

Intuïtief zal, bij sedimentverdeling tussen hoofd- en nevengeul, direct teruggedacht worden aan de modelresultaten van Bulle (1926)⁶. Echter, over het aandeel van sedimenttransport richting de nevengeul als gevolg van spiraalstroming is nog niet veel bekend. De verwachting is daarom dat de spriaalstroming een verwaarloosbaar aandeel heeft in de sedimentverdeling over hoofd- en nevengeul. De resultaten van Bulle (1926) kunnen worden verklaard doordat hij in zijn experimenten keek naar een riviersplitsing van gelijkwaardige dimensies. De situatie bij een nevengeul ligt anders; de dimensies van de nevengeul zijn beduidend kleiner dan die van de hoofdgeul. De nevengeul is zowel minder diep als minder breed. Hierdoor zal enkel een kleine spiraalstroming in het bovenste deel van de waterkolom worden opgewekt. Gezien het meeste sediment in de Nederlandse rivieren over de bodem wordt getransporteerd, wordt verwacht dat deze kleine spiraalstroming hier geen effect op hebben.

Het hypothetische effect van de bifurcatiehoek is dat deze invloed heeft op de mate van sedimentatie in de hoofdgeul. Wanneer de bifurcatiehoek klein is, zal het water

⁶ Meer informatie over het Bulle-effect is te vinden in bijlage A.

gemakkelijker de nevengeul instromen en daarmee een groter volume water. Het volume water in de hoofdgeul neemt hierdoor af en mede de transportcapaciteit van de hoofdgeul. In het geval de bifurcatiehoek groter is, zal er minder water onttrokken worden door de nevengeul. Dit leidt tot een kleinere afname in volume van de hoofdstroom, waardoor er minder sedimentatie plaats zal vinden.

Opgemerkt moet worden dat de aanwezigheid van een krib ook invloed uitoefent op de bovenbeschreven processen. De onttrekking van water door een nevengeul in een kribvak zorgt voor verhoogde stroomsnelheden binnen het kribvak (bij de ingang van de nevengeul, op de plek waar de stroming loslaat), wat zelfs kan leiden tot uitschuren van de benedenstroomse krib. Een kleinere bifurcatiehoek zal volgens Mosselman, Jagers en Schijndel (2004) zorgen voor mindere uitschuring van kribben. Zie volgende paragraaf voor meer informatie.

Het hypothetisch effect van de bifurcatie hoek is:

- 1) Meer sedimentatie in de hoofdgeul wanneer de bifurcatiehoek klein is;
- 2) Minder uitschuring van omliggende kribben als bifurcatiehoek klein is;
- De spiraalstroming, opgewekt door de bocht die de nevengeul met de moedergeul maakt, heeft een verwaarloosbaar effect op de sedimentverdeling tussen hoofd- en nevengeul.

3.1.2. Aftaklocatie in het kribvak

Mosselman, Jagers en Schijndel (2004) deden onderzoek naar de verschillen tussen aftakkingen bovenstrooms en benedenstrooms in het kribvak (Figuur 3-1), op hydroen morfodynamisch gebied. Aan de hand van de naamgeving als gegeven in Figuur 3-1 worden de resultaten van Mosselman et al. (2004) hieronder in willekeurige volgorde besproken.



Figuur 3-1. Plek van aftakken in het kribvak.

Benedenstrooms (situatie 3 - Figuur 3-1)

Bij een nevengeul direct stroomopwaarts van een krib (situatie 3 - Figuur 3-1) wordt verwacht dat er een stroming opgewekt wordt die geultjes gaat uitgraven, welke de benedenstrooms gelegen krib waarschijnlijk zal gaan uitschuren. Belangrijk is dus om de aftakking niet te dicht bij de krib te plaatsen. Ook wordt verwacht dat de

uitschuursnelheden afnemen wanneer de nevengeul onder een kleine hoek afbuigt. (Mosselman, Jagers, & Schijndel, Optimalisatie inlaat nevengeulen, 2004).

Bovenstrooms (situatie 1 - Figuur 3-1)

Bij een nevengeulaftakking direct stroomafwaarts van een krib (situatie 1 - Figuur 3-1) zal het water met een grotere bocht richting de nevengeul worden geleidt (Figuur 3-2). Dit heeft tot gevolg dat er aan de benedenstroomse oever van de nevengeul een neer ontstaat (in de nevengeul) die zorgt voor sedimentatie (halve blauwe ellips Figuur 3-2). Aan de bovenstroomse oever van de nevengeul zal juist oevererosie op kunnen treden (als de oever niet sterk genoeg is). Dit kan tot gevolg hebben dat de bovenstroomse krib achterloops wordt.



Figuur 3-2. Tijdsgemiddeld en dieptegemiddeld stroombeeld voor een nevengeul direct stroomafwaarts van een krib (richting en grootte). Bewerkt figuur uit (Mosselman, Jagers, & Schijndel, Optimalisatie inlaat nevengeulen, 2004); rode pijl geeft stroomrichting weer, de kribben zijn bruin omlijnd en de blauw ovaal geeft neer aan die zorgt voor sedimentatie.

Bij een nevengeul die direct stroomafwaarts van een krib ligt, leggen waterdeeltjes een langere weg af. Hierdoor zal de nevengeul minder zwevend sediment ontvangen, ondanks de initieel hogere transportcapaciteit. Het zwevend sediment heeft meer tijd om te bezinken in het kribvak wanneer er sprake is van een bovenstroomse (situatie 1) inlaat ten opzichte van een benedenstroomse (situatie 3). Deze bezinklengte heeft met vele factoren te maken, waaronder de waterdiepte in het kribvak, de hydraulische ruwheid, stroomsnelheid en de valsnelheid van het sediment (Mosselman, Jagers, & Schijndel, Optimalisatie inlaat nevengeulen, 2004).

Dubbele neer

In werkelijkheid zijn er twee mogelijkheden voor circulatiestromen in een kribvak. Naast de enkele neer die naar voren kwam in de studie van Mosselman et al. (2004), komen ook dubbele neren voor (Figuur 3-3). Dubbele neren treden op wanneer de kribben verder uit elkaar liggen. Het water stroomt dan in het midden het kribvak binnen en splitst in twee neren, waarvan één in bovenstromse en één in benedenstroomse richting. Wanneer een nevengeul in het midden tussen twee kribben aftakt, kan het gebeuren dat het water in beide neren opsplitst voordat het bij de instroomopening van de nevengeul komt. De hoeveelheid water dat de nevengeul instroomt, is dan gereduceerd met het afgebogen water dat richting de twee neren is gegaan.



Figuur 3-3. Dubbele neer in kribvak,

Hypothese

Er is een hypothese opgesteld voor beide hydrofynamische fenomenen. Wanneer er sprake is van één neer dan worden de conclusies van Mosselman et al. (2004), zoals hierboven beschreven, als hypothese aangenomen. Met als toevoeging dat wanneer een nevengeul in het midden tussen twee kribben aftakt (situatie 2 - Figuur 3-1), verwacht wordt dat dezelfde aspecten zullen plaatsvinden als bij een nevengeul direct benedenstrooms van een krib (Figuur 3-2). Echter, wel in mindere mate. De kans op oevererosie aan de bovenstroomse zijde van de nevengeul zal lager zijn. Evenals de hoeveelheid sedimentatie aan de benedenstroomse zijde van de nevengeul. In het geval van een dubbele neer, wordt verwacht dat de nevengeulonttrekking bij de aftakking in het midden wordt gereduceerd. De aftakking boven- of benedenstrooms resulteren in dezelfde morfodynamische processen als bij de hierboven beschreven situatie 2 (Figuur 3-1).

3.1.3. Breedte en diepte van de nevengeul

Op basis van persoonlijke communicatie met Verbruggen (2010) is de hypothese opgesteld dat bij een breedte/diepte-verhouding tussen de 20 en 40 alternerende banken optreden. Deze hypothese is uitgebreid met de keuze om een diepere, smalle nevengeul te verkiezen boven een bredere ondiepe. Dit is gebaseerd op de expertise van Gerritsen en Schropp (2010). Een diepe/smalle nevengeul onttrekt meer debiet dan een ondiepe/brede nevengeul. Hierdoor treed er minder sedimentatie op in de nevengeul.

3.1.4. Instroomdrempel

Bij het aanleggen van een nevengeul kan overwogen worden om een instroomdrempelconstructie te maken. Een instroomdrempel zorgt ervoor dat de nevengeul minder snel mee stroomt, maar dat er sedimentatie in de nevengeul plaatsvindt (Gerritsen & Schropp, 2010). Een nevengeul zonder instroom-drempelconstructie zal vaker (soms zelfs altijd) mee stromen met de hoofdgeul. In dit geval zal sneller een morfodynamisch evenwicht ontstaan. Gerritsen en Schropp (2010) concluderen dat wanneer een nevengeul aangelegd wordt met als doel de waterstand bij (maatgevend) hoogwater te verlagen, een instroom-drempelconstructie bij de inlaat de voorkeur heeft. De drempel beperkt dan de instroom van zand bij hoogwater. Echter, een instroomdrempel verhoogt wel de kans op sliblast in de nevengeul (Gerritsen & Schropp, 2010). Slibrijk water wordt de nevengeul ingevoerd in tijden van hoogwater, wanneer het uitzakt in het stagnante water. Slibarm water stroomt vervolgens de nevengeul uit. In de vorige paragraaf zijn hypotheses geformuleerd voor het effect van de vijf geselecteerde ontwerpparameters op de hydro- en morfodynamiek in nevengeul/hoofdgeul-systeem. De volgende paragraaf formuleert een hypothese voor het effect van uiterwaardstroming op de hydro- en morfodynamiek in nevengeul/hoofdgeul-systeem.

3.2. Verwacht effect uiterwaardstroming

Een jaarlijks terugkomende situatie in Nederland is dat de uiterwaarden naast de takken van de Rijn voor een bepaalde periode meestromen met de rivier. Dit wordt veroorzaakt door een schommeling in afvoer als gevolg van onder anderen weersveranderingen. De effecten hiervan op de morfodynamica van een nevengeul zijn nog onduidelijk.

Binnen dit onderzoek is de combinatie gemaakt van een tweedimensionaal model met een quasistationair afvoerbenadering (variabele afvoer) als bovenstroomse randvoorwaarde. In het verleden zijn er twee combinaties van modellen opgesteld. De eerste is een combinatie van een eendimensionaal model met een variable afvoer als bovenstroomse randvoorwaarde. De tweede is een tweedimensionaal model met een constante afvoer als bovenstroomse randvoorwaarde. Uit onderzoek van Van Putten (2011) bleek dat nevengeulen het best gemodelleerd kunnen worden met tweedimensionale modellen.

Momenteel is er nog niet veel bekend over geheel meestromende uiterwaarden waarin zich nevengeulen bevinden. Wel zijn er hypotheses gemaakt van enkele processen die hierbij te verwachten zijn. Dezelfde processen een rol als wanneer een uiterwaard zonder nevengeul mee zal stromen.

Deze processen hebben een relatie met het parallel stromen aan de nevengeul en het dwars stromen over de nevengeul (Klop, 2009; Figuur 3-4). Ten eerste zal het water, wanneer, het parallel over de nevengeul stroomt, ter plekke van de nevengeul een lagere weerstand ondervinden. Dit heeft als effect dat de snelheid in de nevengeul hoger is dan in de uiterwaarden. De weerstand in de nevengeul is lager door twee componenten; (i) de kleinere bodemweerstand in de nevengeul door minder vegetatie en (ii) de grotere waterdiepte in de nevengeul. Hierdoor zal er meer water richting de nevengeul 'getrokken' worden en zal de sedimenttransportcapaciteit ter hoogte van de nevengeul toenemen. Dit komt overeen met de gevonden bodemerosie bij situaties als deze (Klop, 2009). Ten tweede zal het water, bij de delen van de nevengeul waar de uiterwaardenstroming juist dwars overheen zal stromen (Figuur 3-4), een grotere weerstand ondervinden. De verdieping van de nevengeul wordt door het water ervaren als een groter doorstroomoppervlak en leidt tot een lagere stroomsnelheid. Dit heeft een lagere sedimenttransportcapaciteit tot gevolg. De nevengeul kan bij dwarsstromingen gezien worden als een soort sedimentvang.



Stroming parallel over de nevengeul

Figuur 3-4. Dwars-/parallelstromingen (het paarse pijltje komt overeen met de oranje pijl in het plaatje).

De mate waarin een stroming parallel of juist dwars over de nevengeul stroomt, kan weergegeven worden met een oriëntatiehoek⁷ (Figuur 1-2). Wanneer een nevengeul dwars op de hoofdgeul zou staan, zou de oriëntatiehoek groot zijn. Dit leidt tot een vertraging van de transportcapaciteit en heeft sedimentatie of minder erosie tot gevolg.

Toch wordt verwacht (persoonlijke communicatie Schielen, 2012) dat indien sedimentatie optreedt in de delen van de nevengeul die dwars op de stroomrichting staan, dit later weggespoeld zal worden. De nevengeul kan het volgende proces doorlopen:

- 1. De nevengeul staat droog;
- 2. De afvoer is dusdanig toegenomen dat de waterstand in de hoofdgeul de instroomhoogte van de nevengeul bereikt; de nevengeul stroomt mee;
- De afvoer is toegenomen tot een situatie waarbij de uiterwaard ook mee stroomt; dit zal leiden tot aanzanding in delen van de nevengeul die dwars op de stroomrichting staan en erosie in de delen die parallel liggen aan de stroming;
- De afvoer neemt af en het water stroomt enkel door de hoofd- en nevengeul; dit water zal het afgezette sediment wegspoelen richting het deel van de nevengeul dat is uitgediept door erosie in de vorige stap;
- 5. De afvoer zal verder afnemen, waardoor de nevengeul niet meer zal meestromen.

⁷ Hierbij wordt aangenomen dat de stroming in de uiterwaarden parallel stroomt aan de hoofdgeul. De oriëntatiehoek is de hoek tussen de nevengeul en de hoofdgeul. Vaak wordt hierbij de gemiddelde hoek genomen, maar deze kan ook variabel over de lengte aangenomen worden.

4 Numeriek model

Zoals aangegeven in §1.3 Onderzoeksaanpak is ter ondersteuning van dit afstudeeronderzoek een numeriek model opgesteld. In dit hoofdstuk komen achtereenvolgens aan bod: de modelleeraanpak (§4.1), algemene informatie over het gebruikte programma Delft3D (§0), de modelopbouw (§4.3) en de gekozen modelvarianten (§4.4).

4.1. Modelleeraanpak

Er is een numeriek model opgezet van een stukje Nederlandse rivier. Hierin zijn, in tegenstelling tot eerder opgestelde modellen, de uiterwaarden rond de moedergeul meegenomen. Met dit model zijn twee verschillende analyses uitgevoerd (Schema 1). Allereerst zijn de vijf ontwerpparameters⁸ gevarieerd om de invloed van deze parameters te bepalen op de hydro- en morfodynamica in zowel hoofd-, nevengeul, als in de uiterwaard. Ten tweede geeft het model inzicht in de effecten van een variabel debiet op de nevengeul en de uiterwaard waar de nevengeul door stroomt. De uitgangspunten voor deze twee analyses zijn een zogenoemd basis- en referentiemodel. Het referentiemodel representeert de huidige situatie zonder nevengeul en het basismodel bevat een nevengeul die gemiddelde⁹ dimensies heeft.



Schema 1. Overzicht modelvarianten. Groen gebied: uitgangspositie met referentiemodel (situatie zonder nevengeul) en basismodel (model met nevengeul van gemiddelde dimensies). Blauw gebied: modelvarianten waarbij de initiële condities (ontwerpparameters) gevarieerd zijn. Geel gebied: modelvarianten waarbij het bovenstrooms opgelegd debiet varieert.

 $^{^{8}}$ Bifurcatiehoek, plek van aftakken in het kribvak, nevengeulbreedte, nevengeuldiepte en instroomdrempel.

⁹ Gemiddelde bifurcatiehoek (45°), aftaklocatie (midden in kribvak), breedte (100 m) en diepte (3,5 m). Tevens heeft het basismodel geen instroomdrempel.

4.2. Introductie Delft3D

Binnen dit onderzoek is het tweedimensionale¹⁰ Duurzame Vaardiepte Rijndelta (DVR-) model (§1.3.2) van februari 2012 verder uitgebreid. Het DVR-model is opgebouwd in Delft3D. Delft3D is een numeriek softwarepakket dat zich voornamelijk richt op oppervlaktewater, ontwikkeld door Deltares. Met dit softwarepakket kan zowel tweedimensionaal als driedimensionaal worden gerekend aan waterstromingen, sedimenttransport en morfologische processen, golven, waterkwaliteit en een combinatie hiervan (Deltares, 2010). Het softwarepakket is opgebouwd uit een aantal modulen. De module Delft3D-Flow is gebruikt voor het modelleren van nevengeulsystemen. Delft3D-Flow faciliteert functies om inzicht te krijgen in zowel hydrodynamica, sedimenttransport als bodemveranderingen (Figuur 4-1).



Figuur 4-1. Morfologische lus; interactie tussen hydrodynamica, bodemverandering en sedimenttransport.

Het programma Delft3D is opgebouwd uit een reeks procesomschrijvende formules. Deze procesomschrijvende formules beschrijven gezamenlijk de gehele morfologische lus (Figuur 4-1). In bepaalde gevallen zijn deze formules vastgelegd (zoals bij de omschrijving van de waterbeweging), terwijl bij andere processen een keuze gemaakt kan worden (zoals bij het bepalen van de ruwheid). In Bijlage B wordt verder ingegaan op het rekenrooster, de procesomschrijvende formules van de waterbeweging en de parametrisatie van de spiraalstroming.

4.3. Modelopbouw

Deze paragraaf beschrijft de opbouw van het opgestelde model voor dit onderzoek. Er wordt gestart met een introductie van het DVR-model, waarna de locatiekeuze wordt onderbouwd. Vervolgens wordt kort ingegaan op het rekenrooster. De initiele condities en randvoorwaarden worden besproken en er wordt afgesloten met de gekozen parameterinstellingen.

¹⁰ Uit onderzoek van Van Putten (2009) blijkt dat tweedimensionaal modelleren de voorkeur heeft voor het analyseren van morfodynamiek in nevengeulsystemen. Bij eendimensionale modellen wordt een splitsingpuntrelatie opgelegd waarbij de sedimentverdeling tussen hoofd- en nevengeul wordt bepaald door de debietverdeling. Omdat dit in werkelijkheid niet altijd op gaat en deze relatie niet opgelegd hoeft te worden bij een tweedimensionaal model, heeft de laatste de voorkeur. Daarnaast vergt een driedimensionaal model meer rekentijd en levert geen grootschalig verschil in uitkomst met een tweedimensionaal model.

4.3.1. Introductie Duurzame Vaardiepte Rijndelta model

Het Duurzame Vaardiepte Rijndelta model (DVR-model) is een tweedimensionaal numeriek hydromorfodynamisch model van het Rijnsysteem in Nederland. Zoals de naam als zegt, bevat het model de hoofdrivieren van de Rijndelta, namelijk de Bovenrijn, Waal, Pannerdensche Kanaal, IJssel, Nederrijn en de Merweden. De randen van dit model liggen op de winterdijken, bovenstrooms op de grens waar de Rijn Nederland instroomt en benedenstrooms van de riviertakken, op de randen van de meren, estuaria en zee waar de Rijntakken in uitmonden. Voor meer informatie over het DVR-model wordt verwezen naar Yossef, Giri en van der Mark (2010).

4.3.2. Locatiekeuze

De keuze voor het DVR-model (§1.3.2) brengt een locatiekeuze met zich mee. De locatiekeuze is gebaseerd op (1) wensen die gesteld zijn in het kader van dit onderzoek, (2) informatie uit de literatuur (zoals informatie over huidige, geplande en potentieel aantrekkelijke nevengeullocaties) en (3) input van verschillende experts op gebied van nevengeulen.

- Om de effecten van de variatie in één ontwerpparameter te kunnen isoleren, gaat de voorkeur uit naar een locatie waar andere hydro- en morfodynamische processen weinig invloed hebben. Om deze reden vallen de locaties dicht bij bochten, bergende gebieden en riviersplitsingen af. Tevens is een doel van het onderzoek om uiterwaardenstroming te analyseren. Dit brengt als eis mee dat de nevengeullocatie in een ruime uiterwaard moet liggen.
- 2. Peters (2009a) oppert handvaten voor het vinden van een locatie voor nevengeulsystemen: het analyseren van de knelpunten, historische kaarten, het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland), bestaande structuren en huidig landgebruik in en rond het riviersysteem.
- 3. Experts (Schielen, E-mail conversatie over locatiekeuze, 2012)(Sloff, Persoonlijke communicatie locatie keuze, 2012) adviseren om de Waal te verkiezen boven de IJssel als locatie voor een nevengeul, omdat de IJssel een kleinere rivier is en daarom al snel wat meer verstoringen zal hebben.

Uit de analyse, gebaseerd op de geadviseerde handvaten van Peters, 2009a, de zelfopgestelde wensen voor de locatie en de mening van experts Schielen (2012) en Sloff (2012), bleek dat de Afferdensche en Deestsche waarden (vlak bij Druten) de beste locatie voor deze modelstudie te zijn (Figuur 4-2). De uiterwaard waarin de nevengeul gesitueerd zal worden, ligt langs de Waal van rivierkilometer 899 tot 903 (Figuur 4-3).

4.3.3. Rekenrooster

Het rooster in het DVR-model is te grof om nevengeulen te kunnen modelleren. Wanneer een nevengeul gemodelleerd zal worden in het huidige DVR-model zonder roosterverfijning, zal de nevengeul één roostercel breed zijn. Dit is te weinig om sedimentatie en erosiepatronen te kunnen registreren die zich binnen de nevengeul ontwikkelen. Een verfijning van het rooster leidt, zoals eerder genoemd, altijd tot een langere rekentijd. Daarom is het domein van interesse zo klein mogelijk gemaakt en het rooster meer verfijnd rond de locatie van de nevengeul.



Figuur 4-2. Gekozen locatie (zie ook Figuur 4-3). Het water stroomt van oost naar west.



Figuur 4-3. Locatiekeuze nevengeul in Afferdense en Deestsche-waarden nabij Druten. Het water stroomt van rechts naar links (van oost naar west).

In Figuur 4-4 is een deel van de Waal uit het DVR-model te zien. Het DVR-model bestaat op zichzelf al uit domeinen. Het domein waarbinnen de projectlocatie ligt is blauw gekleurd. Een deel van dit blauwgekleurde domein is uiteindelijk gebruikt binnen deze studie. Het geselecteerde gebied heeft een lengte van ongeveer 4 km (Figuur 4-3) en start bij rivierkilometer 899 en eindigt bij rivierkilometer 903. Het geselecteerde rooster is vervolgens verfijnd, waarbij een hogere concentratie roostercelen op de plek van de nevengeul aanwezig zijn (Figuur 4-5). De roostercellen zijn ongeveer 7 m breed in de nevengeul, 15 m in de hoofdgeul en 60 m in de uiterste punten van de uiterwaarden. De lengte (in de stroomrichting) van de roostercellen is over het gehele domein ongeveer 20m.

Voor meer informatie over het rekenrooster wordt verwezen naar bijlage B1.



Figuur 4-4. Stuk van de Waal uit het DVR-model met in blauw het domein van het DVR-model waarin de projectlocatie ligt.



Figuur 4-5. Een verfijning van het geselecteerde stuk rooster uit het DVR-model.
4.3.4. Initiële condities

Deze paragraaf beschrijft op welke manier de initiële condities ingevoerd zijn in het model.

De gegevens van het geselecteerde gebied (zoals bodemhoogte, hydraulische ruwheid, locaties van kribben, dijken en steile obstakels) zijn uit Baseline gehaald en toegeschreven aan een roostercel of hoekpunt daarvan (Figuur 4-6). Baseline is een database ontwikkeld door Deltares voor 'Hydraulische Randvoorwaarden 2006' en beschrijft zo nauwkeurig mogelijk de situatie in 2004. In de uiterwaard van interesse is de bodem geëgaliseerd en zijn obstakels zoals sluisjes verwijderd (Figuur 4-6). Dit is gedaan om het effect van bodemfluctuaties op de te onderzoeken ontwerpparameters zo klein mogelijk te houden. De keuze om de uiterwaard te egaliseren heeft tot gevolg dat bestaande zandwinplas en meren niet meer aanwezig zijn in het model. De bodem is geëgaliseerd op een waarde van 7.5 m⁺NAP, gebaseerd op de gemiddeld lokale bodemhoogte rondom de bestaande nevengeulen en meren. De bodem die initieel is opgelegd in de hoofdgeul is gebaseerd op multibeam rivierbodemmetingen uit 2002. Het opgestelde Delft3D-model voor dit onderzoek is te grof om alle bodemvormen uit de multi-beam-metingen te representeren. Hierdoor wordt het sediment op de bodem herverdeeld tijdens de modelsimulaties (Schema 2, Schema 3 en Schema 4 in bijlage D1). Dit resulteert in een vlakkere bodem.





Figuur 4-6. Versimpeling van de uiterwaard. Links boven: luchtfoto (Google, 2012). Rechts boven: Dataproject op rooster vanuit database *Baseline*. Onder: basismodel.

De as van de nevengeulaftakking maakt de gekozen bifurcatiehoek met de hoofdgeul; de hoek bij aantakken is gelijk aan de bifurcatiehoek (Figuur 4-6). Tussen de hoofd- en nevengeul wordt een minimale afstand van 100 m aangehouden. Daarnaast is op locatie waar de nevengeul aftakt en uitmondt een krib verwijderd. De twee kribben waartussen de nevengeul aftakt liggen daardoor ongeveer 250 meter uit elkaar. Ook wordt gezorgd dat de afstand tussen het bifurcatiepunt en de dichtstbijzijnde krib niet kleiner is dan 40 m.

De breedte is de gemiddelde breedte van de nevengeul. Door de taludkeuze zal deze bij het wateroppervlak dus breder zijn en bij de bodem smaller. De diepte loopt trapsgewijs af volgens het gekozen talud. Daarnaast is de instroomdrempel gemodelleerd als een lokale bodemverhoging, welke niet kan eroderen en de ruwheid heeft van beton. De breedte van de drempel, is door roosterbeperkingen 10m (smaller kon niet).

4.3.5. Randvoorwaarden

Deze paragraaf omschrijft de opgelegde randvoorwaarden in het model. Hierbij zijn een aantal gesloten en open randvoorwaarden gedefinieerd. De gesloten randvoorwaarden bestaan uit de bodem en de winterdijken die aan weerszijden van het model liggen. De laatste zijn oneindig hoog verondersteld. Op de open randen zijn stroming- en transportrandvoorwaarden gedefinieerd. Beiden worden hieronder kort toegelicht.

Stromingrandvoorwaarden

Op de instroomrand (Figuur 4-5) is een debiet gedefinieerd dat is gekozen voor de desbetreffende variant. Hierbij komen zowel modelsimulaties voor waarbij bovenstrooms een constant debiet wordt opgelegd, als een variabele afvoer.

In Delft3D bestaan morfologische simulaties uit twee stappen. Allereerst wordt een hydrodynamische simulatie uitgevoerd. Wanneer de hydrodynamica gestabiliseerd is, wordt de daadwerkelijke berekening uitgevoerd. Hierin is een constante wisselwerking tussen de hydro- en morfodynamica. Bij deze simulaties wordt gerekend met respectievelijk hydrodynamische en morfologische tijdsschaal, waarbij de eerste veel kleiner is dan de laatste. Een morfologische stap is in de orde grootte van dagen of weken, terwijl een hydrodynamische stap in de orde grootte van minuten en uren is(Jörissen, 2001). Om te voorkomen dat de simulatie meer tijd kost dan beschikbaar voor dit onderzoek, is een debietcurve opgedeeld in stationaire stappen (Figuur 4-10). Eerst wordt de hydro- en morfodynamica bepaald met de eerste stationair afvoerwaarde. De gesimuleerde bodemveranderingen dienen vervolgens als input voor de volgende periode die met de tweede stationaire afvoer wordt benaderd. Zo worden alle quasistationaire stappen van de debietcurve doorlopen.

Daarnaast is op de modelrand benedenstrooms (Figuur 4-5) een waterstand opgelegd, behorende bij het gekozen debiet. Deze waterstand is bepaald met een Q/h-relatie, welke gebaseerd is op beschikbare afvoergegevens (Rijkswaterstaat, 2012) (afvoergegevens van januari 1989 tot en met februari 2011 en waterstandgegevens van januari 1990 tot en met oktober 1995).

Transportrandvoorwaarde

Bij de bovenstroomse rand (Figuur 4-5) wordt een instroomrandvoorwaarde opgelegd voor het debiet en voor het sediment. Hieronder is kort uitgelegd wat gekozen is als instroomrandvoorwaarde voor de sedimentflux.

In Delft3D kan de sedimentflux op twee manieren worden gedefinieerd: als een volume sediment wat per tijdseenheid het domein instroomt of als een constante stijging/daling van de bodem op de rand van het domein. Gekozen is om de laatste op te leggen, omdat er metingen zijn van de bodem stijging/daling in de Waal. In bijlage C2 zijn de metingen opgenomen; single-beam over de periode 1990 – 2006 (Yossef, Stolker, Giri, Hauschild, & Van Vuren, 2008). Gekozen is om bij de instroomrand geen stijging of daling van de bodem te definiëren, maar deze vast te leggen (dus een constante stijging van 0). Hiervoor is gekozen omdat de gemiddelde bodemmetingen tussen rivierkilometer 898 en 905 (gekozen locatie; §4.3.2) nul zijn (bijlage C2).

4.3.6. Parameterinstellingen

Zoals aangegeven in de voorgaande paragrafen, is een deel van de rivier de Waal gemodelleerd. Door deze keuze liggen veel parameters al vast, zoals de helling, doorstroomprofiel van de Waal, ruwheden en obstakels (zoals genoemd, verkregen uit Baseline). In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de gekozen transportformule, korrelgroottes, tijdstap en de morfologische factor.

Transportformule

Over het algemeen kan worden gezegd dat de transportformule van Meyer-Peter en Muller het beste toegepast kan worden bij berekeningen in het bovenstroomse deel van Nederlandse Rijntakken. Voor de benedenstroomse delen van de Nederlandse Rijntakken kan de transportformule van Engelund en Hansen het best gebruikt worden. Daarom is voor het DVR-model gekozen voor een transportformule (opgesteld door Van Rijn), die voor alle Rijntakken goed zou moeten werken. In het bovenstroomse deel Rijntakken zullen de uitkomsten meer richting de Meyer-Peter en Muller uitkomsten gaan en in de onderste Rijntakken meer richting een die van Engelund en Hansen (Yossef, Stolker, Giri, Hauschild, & Van Vuren, 2008).

Het DVR-model is gekalibreerd met de gekozen ruwheidformule van Van Rijn, het is daarom niet mogelijk de transportformule-keuze te veranderen. In het model zal met de aangepaste transportformule van Van Rijn gerekend worden. In deze formule wordt de valsnelheid van het sediment [m/s] bepaald aan de hand van de aangepaste formule van Hallermeier (1981) (Ahrens, 2000). Deze formule staat gegeven in bijlage C3. De overige waarden voor de transportformule staan weergegeven in Tabel 4-1.

Parameter	Waarde [eenheid]
α_1	1.0 [-]
RKSC; bodem ruwheidhoogte	0.3 [m]
α_b ; Calibratiecoëfficiënt voor bodemtransport	0.3 [-]
α_s Calibratiecoëfficiënt voor zwevend sedimenttransport	0.2 [-]
θ_{cr} Kritieke Shieldsparameter	0.016 [-]

Tabel 4-1. Gebruikte waarden voor de aangepaste ruwheidsformule van Van Rijn (Deltares, 2010).

Korrelgroottes

Initieel is per roostercel één korreldiameter bepaald. Voor het DVR-model zijn verschillende bodemmonsters genomen, waaruit de gemiddelde korrelgroottes bepaald zijn. Tijdens de calibratie van het model, zijn de korrelgroottes deels als calibratieconstante gebruikt. Dat betekent dat alle kleine onzekerheden bij elkaar terug vertaald zijn in aanpassingen van de korrelgroottes. Dit is echter wel gebeurd binnen de range van de plaatselijke bodemmonsters. De gebruikte korreldiameters zijn weergegeven in Figuur 4-7 en variëren van 1,39 mm tot 1,51 mm.



Figuur 4-7. Korrelgroottes als gebruikt in modelsimulaties. Per roostercel wordt een andere korrelgrootte (D₅₀ [m]) gebruikt.

Tijdstap

De verfijning van het rooster heeft tot gevolg dat ook de tijdstap van de simulatie verfijnd zal moeten worden om een numeriek stabiel model te houden. Echter, hoe kleiner de tijdstap, hoe langer het model moet draaien. Om een zo groot mogelijke tijdstap te vinden waarbij het model nog stabiel is, is een stabiliteitsanalyse uitgevoerd door opzoek te gaan naar de grootste tijdstap waarbij de waterstand naar een constante waarde convergeert.

Het Courantgetal (Bijlage C) drukt de stabiliteit van een numeriek model uit. Voor de stabiliteitsanalyse is aangehouden:

$$C_f = 2\Delta t \sqrt{g H \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} > 10$$

Uit de stabiliteitsanalyse bleek dat de grootste tijdstap voor de hierboven geformuleerde modelcondities Δt =0.05 minuten (3 seconden) is.

In de hoofdgeul waren de roostercellen 15 bij 20 meter groot en kunnen waterdieptes van 10 meter bereikt worden. Het Courantgetal is in dit geval:

$$C_f = 2\Delta t \sqrt{g H \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} = 2(3) \sqrt{(9.81) * (10) * \left(\frac{1}{15^2} + \frac{1}{20^2}\right)} = 4,1$$

In de nevengeul zijn de roostercellen 7 bij 20 meter groot en is de maximale waterdiepte 5 meter. Het Courantgetal is in dit geval:

$$C_f = 2(3)\sqrt{(9.81)*(4)*\left(\frac{1}{7^2}+\frac{1}{20^2}\right)} = 6,7$$

Morfologische factor

Morfodynamische processen treden op korrelgrootteschaal op. Hierdoor moeten er vele korrels verplaatst zijn om conclusies te kunnen trekken op het gebied van morfodynamiek. Tijdschalen in de orde grootte van tientallen jaren, zijn niet ongewoon bij evenwichtsstudies in de morfodynamiek. Binnen het Delft3D-model kunnen de morfodynamische veranderingen opgeschaald worden met de zo genoemde morfologische factor. Op deze manier kunnen sedimentvolumes van enkele uren, worden vertaald naar sedimentvolumes van enkele jaren. De morfologische factoren kunnen effect hebben op de stabiliteit van het model (zie Bijlage C). Doordat er minder sedimenttransport plaatsvindt bij lagere afvoeren, kunnen hogere morfologische factoren gekozen worden. De gekozen factoren, gebaseerd op persoonlijke communicatie met experts (Yossef, Stolker, Giri, Hauschild, & Van Vuren, 2008), voor deze studie staan gegeven in Tabel 4-2.

Debiet [m³/s]	Morfologische factor
900	1440
1400	1440
1900	720
2360	720
2400	720
2900	240
3400	240
4650	120

Tabel 4-2. Gekozen Morfologische factor per debiet.

Viscositeit en diffusiviteit

In het model is gebruik gemaakt van een uniforme eddy (werveling) viscositeit en eddy diffusiviteit. Beide zijn $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$.

4.4. Modelvarianten

Allereerst zijn modelvarianten besproken per gevarieerde ontwerpparameter (de initiële conditievarianten, blauw gebied Schema 1 en Tabel 4-3). Vervolgens zijn varianten beschreven met een variabele afvoer (geel gebied Schema 1). Zoals gezegd gelden het referentiemodel en het basismodel (groen gebied) als uitgangspositie. Beide modellen worden doorgerekend met een stationaire afvoer van $Q=2360 \text{ m}^3/\text{s}$; deze afvoer is oevervullend voor de nevengeul. Er zijn twee redenen voor deze afvoer. Ten eerste stroomt het water bij deze afvoer niet over de

uiterwaard, hierdoor zijn uiterwaardeffecten niet aanwezig, waardoor geobserveerde hydro- en morfodynamische processen enkel beïnvloed kunnen zijn door neven- en hoofdgeul. Ten tweede zal een hogere afvoer zorgen voor extremere morfodynamische effecten, welke daardoor eerder opgemerkt zullen worden bij de analyse van de modelresultaten. De hoogst mogelijke afvoer waarbij de uiterwaard niet mee stroomt is oevervullend. Het referentiemodel representeert de huidige situatie zonder nevengeul en het basismodel bevat een nevengeul die gemiddelde dimensies heeft.

Modelvariaties nevengeul	Ligging aftakking in kribvak	Bifurcatie- hoek [°]	Breedte [m]	Diepte [m]	Instroomdrempel -hoogte [m]
Referentiemodel	NVT	NVT	NVT	NVT	NVT
Basismodel	midden	45	100	3,5	geen
"Plek van aftak"- varianten	bovenstrooms	45	100	3,5	geen
	benedenstrooms	45	100	3,5	geen
Bifurcatiehoek- varianten	midden	20	100	3,5	geen
	midden	70	100	3,5	geen
	midden	90	100	3,5	geen
Breedte/diepte- varianten	midden	45	45	3,5	geen
	midden	45	150	3,5	geen
	midden	45	100	1	geen
	midden	45	100	7	geen
Instroomdrempel- varianten	midden	45	100	3,5	1,00
	midden	45	100	3,5	2,00
	midden	45	100	3,5	3,00

Tabel 4-3. Initiële conditievarianten met stationaire afvoer van Q=2360 m³/s (Nevengeulvullend); varianten op het basismodel.

4.4.1. Modelvarianten in initiële condities (ontwerpparameters)

In deze paragraaf zijn de basiscondities van de vijf geselecteerde ontwerpparameters en de variaties hierop onderbouwd. Als uitgangspunt zijn bij deze varianten de extremen opgezocht om inzicht te krijgen in de effecten van de ontwerpparameters die buiten de huidig gehanteerde vuistregels liggen voor het ontwerp van nevengeulen (§1.1: Tabel 1-1 en Tabel 1-2). Het basismodel zal gemiddelde waarden aannemen voor de vijf geselecteerde initiële condities.

Bifurcatiehoek

De bifurcatiehoek zal realistisch gezien van ~0° tot maximaal 90° kunnen lopen. Gekozen is om met de basisvariant in het midden (op 45°) te gaan zitten. Gezien Van Putten (2011) al heeft gekeken naar kleinere bifurcatiehoeken (<16°) is in dit onderzoek gekeken naar een minimale bifurcatiehoek van 20°.

De plek van aftakken in het kribvak

De extremen, waartussen gevarieerd kan worden bij de plek van aftakken van in het kribvak, zijn: bovenstrooms en benedenstrooms in het kribvak. De basisvariant zal hier precies middenin liggen en takt dus in het midden tussen twee kribben af.

Breedte en diepte van de nevengeul

Een smalle en diepe nevengeul heeft de voorkeur wanneer sedimentatie niet gewenst is in de nevengeul (Gerritsen & Schropp, 2010), doordat de stroomsnelheden hoger zullen zijn dan bij een bredere ondiepe nevengeul. De uiterste breedte van een nog realistische nevengeul langs de waal varieert van 10 meter tot 150 meter (Peters, Kater, & Geerling, 2006). De breedtekeuze is deels beïnvloed door de simulatiemogelijkheden. Realistische resultaten worden pas verkregen als er genoeg roostercellen¹¹ in de breedte van het model aanwezig zijn. Voor de basisvariant is een breedte gekozen die in de gemiddelde range van mogelijke nevengeulbreedtes valt, namelijk 100 meter. Twee varianten, van respectievelijk 45m en 150m breed zullen de uitersten laten zien.

Het bodemniveau (Figuur 4-8) van een nevengeul kan in de extreemste (realistische) gevallen variëren van 0,5 meter onder Overeengekomen Laagste Rivierstand (OLR)¹² tot net onder uiterwaardniveau in het geval dat er geen instroomdrempel aanwezig is. De diepte van de nevengeul is dus afhankelijk van de locatiekeuze. In deze studie is de nevengeul gelegen in de Afferdensche en Deestsche uiterwaard vlak bij Druten. Voor een onderbouwing van deze locatiekeuze wordt verwezen naar §4.3.2.



Figuur 4-8. Dieptes in meter ten opzichte van NAP.

De Overeengekomen Laagste Rivierstand bij rivierkilometer 901 (gekozen locatie; §4.3.2) is 3,95 m⁺NAP. Wettelijk mag de nevengeul dus niet lager liggen dan 3,45 m⁺NAP. Het maaiveld in de gekozen uiterwaard is 7,50 m⁺NAP. De bodemligging kan, in het geval er geen instroomdrempel is, dus variëren tussen 3,45 m⁺NAP en 7,50 m⁺NAP. Dit resulteert in een maximale diepte van 4,05 meter. Voor de basisvariant is gekozen om de bodem op 3,50 meter diepte (4,00 m⁺NAP) te leggen. In het kader van de veiligheid is voor het talud van de oevers van de nevengeul 1:4 genomen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

Instroomdrempel

De instroomdrempelhoogte is afhankelijk van de waterdiepte in de hoofdgeul en de diepte van de nevengeul zelf. De instroomdrempel (gesitueerd bij de instroomopening) bepaalt op welk moment de nevengeul mee zal stromen met de

 $^{^{11}}$ Voor informatie over het model zie §4.3.

 $^{^{12}}$ Afgesproken is dat een nevengeul gesitueerd mag zijn op -0.5 m t.o.v. OLR (dus 3,45 cm+NAP bij rivierkilometer 901), de situatie waarbij 2.80 m vaardiepte gegarandeerd moet worden (WL | Delft Hydraulics, 2003).

hoofdgeul. In de extreme situatie kan een instroomdrempel variëren van een situatie zonder drempel (instroomdrempelhoogte is 0) tot een situatie waarin de drempelhoogte gelijk is aan de zomerdijk ($\pm 10,00 \text{ m}^+\text{NAP}^{13}$). Gekozen is om de basisvariant geen instroomdrempel te geven, zodat de morfodynamische veranderingen in de meeste simulaties maximaal zijn. Hierdoor kunnen de effecten van alle initieel opgelegde parameters binnen deze studie beter worden geanalyseerd. Hierop zijn drie varianten gemaakt, met drempels van 1 m, 2 m en 3 m hoog. Deze liggen respectievelijk -2.5 m, -1.5 m en -0.5 m ten opzichte van het uiterwaardniveau. Het is ook mogelijk om de drempel nog verder te verhogen dan 3 m. Deze optie is niet meegenomen in de analyse omdat er dan bij het gekozen debiet (Q=2360 m³/s) geen water door de nevengeul stroomt.

4.4.2. Modelvarianten in bovenstroomse (debiet)randvoorwaarde

Een onderdeel van het onderzoek is het bepalen van de representatieve stationaire afvoer op morfodynamisch gebied bij nevengeulsimulaties. Onder representatieve afvoer wordt de stationaire afvoer verstaan die de (werkelijke) afvoercurve het best benaderd op morfodynamisch gebied in de nevengeul. Wanneer het enkel mogelijk is (door beperking van model of tijd), met één stationaire afvoer te rekenen, kan worden gekozen voor deze representatieve afvoer. Bij riviermodellen is dit al bekend. Hierbij wordt de afvoer gekozen die oevervullend is. Echter, er is nog niet gecontroleerd of deze afvoer ook de juiste keuze zou zijn als ook een nevengeul in het model aanwezig is. Hierbij is grote interesse van de effecten van uiterwaardstroming op de morfodynamische processen binnen nevengeulen. Daarom zijn modeluitkomsten met een quasistationair debietverloop vergeleken met verschillende modeluitkomsten met een stationair debiet als bovenstroomse randvoorwaarde.

Eerst komt aan bod hoe met de beschikbare afvoergegevens (afvoergegevens van januari 1989 tot en met februari 2011 en waterstandgegevens van januari 1990 tot en met oktober 1995) een quasistationair debietverloop is opgesteld. Daarna zijn de verschillende afvoeren voor de stationaire modelsimulaties afgeleid.

Schematisering hydrograaf

Met de beschikbare afvoergegevens is een representatieve quasistationaire¹⁴ hydrograaf opgesteld. Er zijn zelfs meerdere representatieve hydrografen te creëren met de beschikbare data. Daarom volgt hier een korte uitleg van de totstandkoming van de hydrograaf.

Van de beschikbare afvoergegevens is een curve geplot waarin het aantal dagen per jaar dat een bepaalde afvoer of hoger voorkomt is uitgezet tegen de afvoer (Figuur 4-9). Vervolgens is hierbij een gemiddelde overschrijdingscurve geconstrueerd. Deze gemiddelde overschrijdingscurve kan op meerdere manieren worden benaderd met quasistationaire stappen. Te verwachten is dat de uitkomsten nauwkeuriger worden naarmate er meer quasistationaire stappen worden genomen. Dit zorgt echter wel voor een langere rekentijd. Als restrictie bij het bepalen van het aantal quasistationaire stappen en de lengte ervan is een maximale afwijking van 250 m³/s

 $^{^{13}}$ Dat betekent dat de instroomdrempel 5 meter hoog is (9,00 m⁺NAP) bij een basis nevengeuldiepte van 3,5 meter (4,00 m⁺NAP) t.o.v. maaiveldhoogte in de uiterwaard (7,50 m⁺NAP).

¹⁴ Het gekozen computermodel Delft3D rekent altijd met quasistationaire afvoerstappen. Wanneer een afvoer voorkomt die in een eerdere tijdstap al een keer doorgerekend is, worden de opgeslagen sedimenttransportgegevens gebruikt. Dit reduceert de rekentijd aanzienlijk. De hoeveelheid quasistationaire stappen is mede bepalend voor de rekentijd van het model (meer stappen leidt tot een langere rekentijd).

ten opzichte van de gemiddelde overschrijdingscurve gekozen. Daarbij geldt de restrictie dat de duur van een quasistationaire stap niet korter mag zijn dan 6 dagen. Het resultaat is te zien in Figuur 4-9.

Vervolgens is de schematisering vertaald naar een representatieve hydrograaf. Dit kan op vele manieren. Zo kunnen alle jaarlijkse hydrografen afzonderlijk worden bekeken om er op deze manier (op het oog) een trend uit te halen. De representatieve hydrograaf kan dan op deze (op het oog gekozen) trend worden gebaseerd, met de uitkomsten van de schematisering. Een andere manier om een representatieve hydrograaf op te stellen is het analyseren welke jaarcurve van de overschrijdingsgrafiek het dichtste bij de gemiddelde overschrijdingscurve ligt. De representatieve hydrograaf kan dan worden gebaseerd op de hydrograaf van dit jaar. Gezien de laatst genoemde mogelijkheid tot een hydrograaf resulteerde waarbij de uiterwaard nooit mee zou stromen, is gekozen om de eerste manier toe te passen. De gekozen hydrograaf en de quasistationaire benadering hiervan zijn te vinden in Figuur 4-10.



Figuur 4-9. Gemeten overschrijdingscurves per jaar (1989-2010), de gemiddelde overschrijdingcurve en een schematisatie van de curve.



Figuur 4-10. Quasistationaire benadering (zwart), gebaseerd op de karakteristieken van de afvoerhydrograaf uit 1994/1995 (blauw).

Stationair debiet

In de wetenschappelijke literatuur ontbreekt kennis over het verschil in modeluitkomsten tussen het modelleren met een stationair debiet of een afvoercurve. Modelberekeningen in Delft3D gaan sneller bij de keuze van een stationair debiet, dan dit het geval is bij het definiëren van een afvoercurve.

Het verschil tussen beiden geeft inzicht in de simulatiefout die gecreëerd wordt bij de keuze voor een stationaire afvoer. In dit onderzoek is gekozen om de quasistationaire afvoer (die de afvoercurve representeert) te vergelijken met verschillende modelsimulaties met een stationair debiet. Hierbij zijn acht stationaire debieten gekozen. De eerste zeven hiervan komen overeen met de guasistationaire debietstappen uit de quasistationaire afvoerbenadering, de achtste is de afvoer waarbij de nevengeul precies oevervullend is. Voor deze laatste is gekozen, omdat een oevervullend debiet ook de keuze is wanneer enkel een rivier wordt aemodelleerd. Samenvattend worden de volaende stationaire afvoeren doorgerekend: Q=900 m³/s, Q=1400 m³/s, Q=1900 m³/s, Q=2360 m³/s, Q=2400 m³/s, Q=2900 m³/s, Q=3400 m³/s, Q=4650 m³/s.

5 Resultaten variatie in initiële condities

De uitgevoerde modelsimulaties kunnen worden opgedeeld in twee groepen (Schema 1, H4). Allereerst zijn er simulaties uitgevoerd om de invloed van vijf (Figuur 5-1 en Figuur 5-2) geselecteerde ontwerpparameters te bepalen op de hydro- en morfodynamiek: het initieel ontwerp van de nevengeul varieert. De resultaten hiervan zijn besproken in dit hoofdstuk. Ten tweede zijn modelsimulaties uitgevoerd om het effect van een variabele afvoer te bepalen: de bovenstroomse modelrandvoorwaarde varieert. Deze resultaten zijn gepresenteerd in het volgende hoofdstuk.

Algemene modellen



Modellen met verschillende bifurcatiehoek



Modellen met verschillende aftaklocaties in het kribvak Bovenstrooms Benedenstrooms



Figuur 5-1. Visueel overzicht van de modelvarianten welke gebruikt zijn om de invloed van nevengeul ontwerpparameters te testen. Let op: vervolg in Figuur 5-2.

Modellen met verschillende nevengeuldieptes



Modellen met verschillende nevengeulbreedtes



Modellen met verschillende instroom-drempelhoogtes h = 1 m h = 2 m h = 3 mh = 3 m

Figuur 5-2. Visueel overzicht van de modelvarianten welke gebruikt zijn om de invloed van nevengeul ontwerpparameters te testen. Let op: vervolg van Figuur 5-1.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Eerst wordt kort besproken hoe de figuren in dit hoofdstuk gelezen moeten worden. Ten tweede wordt kort ingegaan op de sedimentheuvel die initieel voor de ingang van de nevengeul ligt. Vervolgens worden de algemene modelresultaten besproken. Daarna zijn de hydro- en morfodynamische effecten per ontwerpparameter in de volgende volgorde geanalyseerd: ontwikkeling van nevengeulonttrekking, waterstandveranderingen, dieptegemiddelde stroomsnelheden en sedimentatie/erosiepatronen. Afgesloten is met een vergelijking van de baggerindicaties van de verschillen varianten.

5.1. Hoe de figuren te lezen

In dit hoofdstuk komen veelal dezelfde typen figuren voor. In deze paragraaf is uitgelegd hoe deze figuren gelezen moeten worden.

In het rapport zijn figuren weergegeven die de onttrekking van de nevengeul presenteren. Nevengeulonttrekkingen zijn uitgezet tegen de simulatietijd. De waarde in jaar nul, staat voor de gestabiliseerde onttrekking na het hydrodynamisch inspelen (met een constante modelafvoer van 2360 m³/s). In de figuren is de verandering van de nevengeulonttrekking door de simulatiejaren heen gepresenteerd. Deze wordt enkel veroorzaakt door de wisselwerking tussen de morfodynamische veranderingen en de hydrodynamiek.

Waterstandveranderingen in de hoofdgeul zijn weergegeven als eendimensionale verschilplots tussen de situatie zonder en met nevengeul. Deze presenteren dus de waterstandstijging en -daling. Op deze manier zijn de gevisualiseerde effecten direct toe te schrijven aan de invloed van de nevengeul. Deze figuren tonen altijd verschillen tussen situaties met een nevengeul minus situaties zonder nevengeul. Dit betekent dat indien het verschil positief is, de situatie met nevengeul een stijging laat zien ten opzichte van de referentie situatie (zonder nevengeul). Negatieve waarden representeren waterstanddaling.

Bodemveranderingen zijn in dit hoofdstuk op twee manieren weergegeven. Allereerst als tweedimensionale verschilfiguren (bovenaanzichten). Deze figuren tonen altijd verschillen tussen eind- en begin bodemliggingen. Dit betekent dat indien het verschil positief is, er sprake is van sedimentatie. Negatieve waarden representeren erosie. Deze figuren bevatten niet het gehele modelgebied, maar enkel het deel waarin de hoofd- en nevengeul gelegen zijn. Ten tweede zijn bodemveranderingen weergegeven aan de hand van dwarsprofielen. De locatie van deze dwarsprofielfiguren is weergegeven in Figuur 5-3.



Figuur 5-3. Locatie dwarsprofielfiguren. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

5.2. Sedimentheuvel voor nevengeulingang

Bij het inpassen van de nevengeul in het geselecteerde stuk DVR-model, moest een krib worden verwijderd. De reden van de verwijdering is dat de "plek van aftak"-varianten beter gemodelleerd kunnen worden wanneer het kribvak groter is (Figuur 5-1). In het model is een krib gemodelleerd met een overlaat. Bij het verwijderen van de desbetreffende krib is geen rekening gehouden met de verhoogde omliggende bodemligging. Hierdoor is centraal in het kribvak waar de nevengeul aftakt (op de plek van de oorspronkelijke krib) initieel een sedimentheuvel te vinden. Gedurende de eerste jaren van de simulatie erodeert deze bodemverhoging. In de simulaties is dit in de eerste jaren terug te vinden als een sedimentatiegolf, gevolgd door een erosiegolf die het domein uit migreert in benedenstroomse richting.

5.3. Algemeen effect aanleg nevengeul

De modelresultaten uit deze studie leveren niet enkel inzicht in het effect van de geselecteerde nevengeul ontwerpparameters, maar ook in het algemene effect van de aanleg van een nevengeul. In deze paragraaf zijn de resultaten besproken die toegeschreven kunnen worden aan de aanleg van een nevengeul in het algemeen.

5.3.1. Algemene tendens

De aanleg van een nevengeul leidt tot een wateronttrekking van de hoofdstroom. Hierdoor neemt de afvoer door de hoofdgeul af. Er is sprake van een waterstandverlaging door een toename van het doorstroom oppervlak (extra water kan afgevoerd worden via de nevengeul). De afname in afvoer door de hoofdgeul leidt tot een reductie van de stroomsnelheid in de hoofdgeul indien het doorstroomprofiel van de hoofdgeul gelijk blijft (Figuur 5-4) en daarmee de transportcapaciteit. Als gevolg ontstaat sedimentatie in de hoofdgeul. Deze sedimentatie beïnvloedt de waterstand bovenstrooms: er treedt waterstandverhoging op. Figuur 5-5 laat beide fenomenen en het gecombineerde resultaat op het waterniveau zien. De extra waterstandverhoging die voort komt uit de sedimentatie in de hoofdgeul wordt in dit geval¹⁵ niet gecompenseerd met de waterstandverlaging die het extra doorstroom oppervlak van een nevengeul met zich mee brengt. Een overzicht van andere mogelijke combinaties is aan de hand van dwarsprofielen geïllustreerd in Bijlage D1.



Figuur 5-4. Stroombeeld hoofd- en nevengeul. Een grotere pijl geeft een grotere stroomsnelheid weer. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

¹⁵ Modelafvoer is 2360 m³/s.



Figuur 5-5. Breedtegemiddelde waterstand en bodemligging hoofdgeul. De gemodelleerde nevenge ulvarianten resulteren allen in een kleine waterstandverhoging over een periode van 10 jaar, met een stationaire afvoer van Q=2360 m3/s. Zwart: originele bodemligging of waterniveau. Blauw: hyd rodynamisch effect. Rood: morfodynamisch effect. Groen: gecombineerd effect.

5.3.2. Hydrodynamiek

In de moedergeul is voor elke variant eenzelfde beeld te zien van de dieptegemiddelde stroomsnelheid, met in het midden van de rivier stroomsnelheden van rond de 1,3 m/s.

De aanleg van een nevengeul leidt tot een dwarsverhang in de waterlijn bij de aftakking van de nevengeul. Hierbij staat het waterniveau in de binnenbocht lager dan in de buitenbocht. Dit komt door de middelpuntsvliedende kracht, welke mede de spiraalstroming opwekt.

Er treden dwarsstromen op als gevolg van de nevengeulonttrekking. Hoe groter de nevengeulonttrekking, hoe groter de opgewekte dwarsstromen. In Figuur 5-6 zijn de dwarsstromen weergegeven van de modelvariant met de grootste wateronttrekking door de nevengeul. Bij de instroomopening blijft de invloed van deze dwarsstroomsnelheden beperkt tot de as van de rivier, bij de uitstroomopening zijn de dwarsstroomsnelheden echter merkbaar bij de overliggende oever van de rivier.



Figuur 5-6. Bovenaanzicht contourlijnen dwarsstroomsnelheden bifurcatievariant 20°. De kleurschaal geeft de grootte weer, de zwarte contourlijnen geven de contouren van het zomerbed weer.

5.3.3. Lokale sedimentatie en erosie

Naast deze algemene sedimentatietendens, vinden sedimentatie en erosieprocessen plaats op een lokale schaal. Ten eerste vindt er sedimentatie plaats in de hoofdgeul langs de linker oever (Figuur 5-7). Dit wordt veroorzaakt door spiraalstroming, het gebied ligt immers in de binnenbocht van de rivier, en een afname in stroomsnelheid doordat de stroming tussen de kribvakken terecht komt in de neer. Ten tweede vindt lokale erosie plaats in de hoofdgeul bij de uitmonding van de nevengeul (Figuur 5-7). Dit wordt veroorzaakt door de verhoogde stroomsnelheden die optreden op het punt waar beide stromen weer samenkomen (Figuur 5-4).



Figuur 5-7. Bovenaanzicht sedimentatie en erosie in de hoofdgeul, van modelvariant met nevengeul ten opzichte van variant zonder nevengeul. De kleurenschaal geeft de grootte weer (rood/paars is sedimentatie en groen/blauw is erosie), de zwarte contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.

Ten derde is er in de eerste binnenbocht van de nevengeul sedimentatie te vinden (Figuur 5-8). Dit wordt veroorzaakt door spiraalstroming die in bochten optreedt. De ontwikkeling van de nevengeul in de tijd is mede weergegeven in Figuur 10 in Bijlage D4.



Figuur 5-8. Algemene sedimentatieprocessen in de hoofd- en nevengeul.

5.4. Bifurcatiehoek

In deze paragraaf worden de hydro- en morfodynamische resultaten gepresenteerd van de modelvarianten met een verschillende bifurcatiehoek. Een bifurcatiehoek kan variëren van ~0° tot 90°. Zoals aangegeven in §4.4.1 zijn Delft3D-simulaties opgezet voor bifurcatiehoeken van respectievelijk 20°, 45° (basismodel), 70° en 90°. Binnen dit onderzoek zijn de hoeken van de benedenstroomse en de bovenstroomse aantakking (bifurcatie) gelijk verondersteld.

Opgemerkt moet worden dat een variatie in bifurcatiehoek mede invloed heeft op de lengteverhouding die de neven- en hoofdgeul met elkaar hebben (Figuur 1-2, H1). Mosselman (2002) classificeerde de lengteverhouding mede als een parameter die invloed heeft op de sedimentatie en erosie. Ondanks dat de lengteverhouding misschien de bepalende parameter is, blijft dit een gekoppelde parameter van de bifurcatiehoek. Daarom zijn de hier gepresenteerde hydro- en morfodynamische veranderingen (indirect) toe te schrijven aan de verandering in bifurcatiehoek. Door beperkte tijd zijn simulaties waarbij de lengteverhouding varieert binnen dit onderzoek niet aan bod gekomen.

Achtereenvolgens worden de resultaten gepresenteerd van de nevengeulonttrekking $(\S5.4.1)$, waterstandveranderingen $(\S0)$, dieptegemiddelde stroomsnelheden $(\S5.4.3)$ en bodemveranderingen $(\S0)$.

5.4.1. Nevengeulonttrekking

Een kleinere bifurcatiehoek resulteert in een grotere debietonttrekking door de nevengeul (Figuur 5-9 - links). Deze grotere debietonttrekking komt doordat het water gemakkelijker een weg in de nevengeul vindt. Daarnaast is links in Figuur 5-9 zeker in de eerste jaren goed te zien dat de nevengeulonttrekking nog niet stabiel is. Dit kan worden verklaard met morfodynamische veranderingen die aanwezig zijn. Zoals gezegd geeft de afvoer op tijdstip 0 de situatie weer waarbij enkel hydrodynamisch is ingespeeld. Het figuur geeft de simulatieperiode weer waarbij de morfodynamiek ook is meegenomen. De invloed van de veranderingen in de doorstroomprofielen van de nevengeul (§5.4.4) zijn in de afvoergrafieken goed terug te vinden: aan het begin van de simulatieperiode zijn de veranderingen extremer.



Figuur 5-9. Links: Nevengeulonttrekking [m³/s] over een periode van 10 jaar bij varianten met verschillende bifurcatiehoeken [°]. Rechts: Niet lineair verband tussen de bifurcatiehoek en de nevengeulonttrekking.

Uit de resultaten blijkt dat het verband tussen de nevengeulonttrekking en de bifurcatiehoek niet lineair is (Figuur 5-9 - rechts). De nevengeulonttrekkingen bij de bifurcatiehoeken van 45° en 70° verschillen maximaal 6% van elkaar. Dit zou kunnen duiden op een range van bifurcatiehoeken waarbinnen de nevengeulonttrekking minder extreem beïnvloed wordt dan buiten deze range.

5.4.2. Waterstandveranderingen

Zoals gezegd zorgen de gemodelleerde nevengeulen voor een kleine stijging van de waterstand in de hoofdgeul en bovenstrooms in de moedergeul (veroorzaakt door de sedimentatie in de hoofdgeul). De waterstandstijging in de hoofdgeul (deel parallel aan de nevengeul) is hier groter dan de stijging bovenstrooms in de moedergeul. In Figuur 5-10 is het verschil in waterstand in de hoofdgeul weergegeven tussen de verschillende bifurcatievarianten en het referentiemodel (welke geen nevengeul bevat). Dit figuur laat dus enkel stijging en daling van de waterstand zien. In de figuur is ook te zien dat een grotere waterstandstijging optreedt bij een kleinere bifurcatiehoek. Dat de waterstandstijging niet lineair verloopt met de grootte van de bifurcatiehoek, kan worden verklaard door een combinatie van de niet lineaire relatie tussen sedimenttransport en stroomsnelheid en de niet lineaire relatie tussen de bifurcatiehoek en de nevengeulonttrekking. De waterstandstijging is immers het gevolg van sedimentatie in de hoofdgeul, welke is teweeggebracht door een afname in transportcapaciteit in de hoofdgeul, als resultaat van de debietafname door de nevengeulonttrekking.



Figuur 5-10. Breedtegemiddelde variatie van waterstand in de hoofdgeul (huidige waterstand minus waterstand zonder nevengeul) voor situaties met verschillende nevengeul bifurcatiehoeken. De verticale onderbroken lijnen geven de af- en aantak locatie van de nevengeul weer.

5.4.3. Dieptegemiddelde stroomsnelheden

Zoals verwacht zijn de dieptegemiddelde stroomsnelheden in de hoofd- en nevengeul beïnvloed door de bifurcatiehoek (Figuur 5-11). De laagste stroomsnelheden in de hoofdgeul zijn te vinden bij de gemodelleerde variant met de kleinste bifurcatiehoek. Hoe groter de bifurcatiehoek, hoe hoger de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de hoofdgeul is.

Voor de dieptegemiddelde stroomsnelheden in de nevengeul is dit juist andersom. De hoogste snelheden treden op bij de kleinste bifurcatiehoek. Terwijl de laagste stroomsnelheid optreedt bij de grootste bifurcatiehoek. Dit kan worden verklaard door het feit dat een kleinere bifurcatiehoek de instroom in de nevengeul vergemakkelijkt (§5.4.1) en daardoor meer water onttrekt. Dit resulteert in hogere stroomsnelheden in de nevengeul en lagere stroomsnelheden in de hoofdgeul. Daarnaast is goed te zien dat de stroomsnelheden in de armen van de nevengeul hoger liggen dan in het deel van de nevengeul dat parallel stroomt aan de hoofdgeul. Dit kan als volgt worden verklaard: De stroming ondervindt invloed van de bochten,



Figuur 5-11. Bovenaanzicht dieptegemiddeld stroomsnelheidpatroon van varianten met verschillende bifurcatiehoek. De kleurschaal geeft de grootte weer, de grijze contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.

zowel bij de in- en uitstroom van de nevengeul, als de bochten in de nevengeul zelf. In deze bochten wordt een spiraalstroming opgewekt, waardoor sedimentatie optreedt in de binnenbocht. Hierdoor versmalt het stroomprofiel en nemen de dieptegemiddelde stroomsnelheden toe.

5.4.4. Bodemveranderingen

Rond de in- en uitstroomopening en langs de oevers van de nevengeul vindt over het algemeen erosie plaats (Figuur 5-12). Bij de varianten met een bifurcatiehoek van 45° en 70° is nagenoeg geen sprake van bodemveranderingen in de nevengeul. Bij de kleinere bifurcatiehoek van 20° is duidelijk erosie waarneembaar in de nevengeul. Een hoek van 90° leidt juist tot sedimentatie in de nevengeul. Wederom kunnen deze fenomenen worden verklaard door de grotere nevengeulonttrekking (§5.4.1). Daarnaast is er, zoals verwacht, sprake van meer sedimentatie in de hoofdgeul bij een kleinere bifurcatiehoek.

Tevens vindt meer erosie plaats in de hoofdgeul vlak na de uitmonding van de nevengeul wanneer de bifurcatiehoek kleiner is (Figuur 5-12). Er wordt bij een kleinere bifurcatiehoek immers meer water onttrokken, alsmede toegevoegd bij de uitmonding. Dit heeft sterkere erosie tot gevolg.

De sedimentatie en erosie-effecten zijn ook goed terug te zien in de dwarsdoorsnede (Figuur 5-13). In de figuur is goed te zien dat de 90°-variant al binnen vijf jaar al het morfodynamisch evenwicht bereikt (voor de andere bifurcatievarianten duurt dit langer). Dit kan verklaard worden door de aanwezige sedimentheuvel bij de ingang van de nevengeul (§5.2). Dit resulteert in een hogere bodemligging van de nevengeul in het eerste jaar. Dit bodemniveau ligt het dichtst bij de evenwichtsituatie van de 90° variant, waardoor dit model eerder in evenwicht is.



Bodemliggingverschil [m] tussen eind- en beginsituatie bifurcatievarianten

Figuur 5-12. Bovenaanzicht sedimentatie- en erosiepatronen van varianten met verschillende bifurcatiehoek. Warme kleuren geven sedimentatie weer en koude kleuren erosie.



Verandering dwarsdoorsnede nevengeul en hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur 5-13. Verandering bodemligging in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor verschillende bifurcatiehoek-varianten. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

5.5. Plek van aftakken in het kribvak

In deze paragraaf worden de hydro- en morfodynamische resultaten gepresenteerd van de modelvarianten met een verschillende aftaklocatie in het kribvak. Hiervoor zijn modelsimulaties uigevoerd waarbij de nevengeul bovenstrooms, in het midden (basismodel) en benedenstrooms in het kribvak aftakt. De opbouw van deze paragraaf is dezelfde als de voorgaande paragraaf.

5.5.1. Nevengeulonttrekking

De grootste nevengeulonttrekking (Figuur 5-14) treedt op bij de variant die benedenstrooms in het kribvak aftakt; ongeveer 12% van de zomerbedafvoer. De variant die bovenstrooms in het kribvak aftakt onttrekt juist de kleinste hoeveelheid; ongeveer 7%. Dit verschil in debietonttrekking kan worden verklaard door het effect van de bovenstrooms gelegen krib. De nevengeul die bovenstrooms in het kribvak aftakt ligt in de luwte van deze krib, hierdoor moet het water met een bocht rond de krib de nevengeul instromen.



Figuur 5-14. Nevengeulonttrekking [m³/s] over een periode van 10 jaar bij varianten met verschillende aftaklocatie in het kribvak.

5.5.2. Waterstandveranderingen

In Figuur 5-15 is de stijging en daling van de waterstand ten opzichte van de situatie zonder nevengeul te zien. De varianten hebben elk een kleine waterstandverhoging tot gevolg. De benedenstrooms in het kribvak gelegen aftakking zorgt voor de grootste waterstandverhoging. Dit komt doordat deze nevengeulvariant meer water onttrekt, waardoor er meer sedimentatie in de hoofdgeul optreedt.



Figuur 5-15. Breedtegemiddelde variatie van waterstand in de hoofdgeul (huidige waterstand minus waterstand zonder nevengeul) voor verschillende aftaklocaties in het kribvak. De verticale onderbroken lijnen geven de af- en aantak locatie van de nevengeul weer.

5.5.3. Dieptegemiddelde stroomsnelheden

Een bovenaanzicht van de dieptegemiddelde stroomsnelheden is gegeven in Figuur 5-17. Hierin is de relatie met de nevengeulonttrekking goed terug te zien (§5.5.1). Zo is te zien dat de deelfiguren behorende bij de aftakking in het midden en benedenstrooms niet veel van elkaar verschillen. Voornamelijk de bovenstrooms gelegen oorsprong van de nevengeul resulteert in andere stroomsnelheden. Doordat deze instroomopening in de luwte van een krib ligt, moet het water met een bocht rond de krib de nevengeul instromen. De stroomsnelheden bij de bovenstroomse oever van de nevengeulingang zijn hierdoor sterk gereduceerd (Figuur 5-17). Daarnaast liggen de stroomsnelheden in de nevengeul bij deze variant in het geheel iets lager, doordat er minder water onttrokken wordt (§5.5.1).

5.5.4. Bodemveranderingen

De relatie met de dieptegemiddelde stroomsnelheden (§5.5.3) is in Figuur 5-16 goed te zien. Bij de variant die in het midden aftakt (basismodel) blijft de nevengeul bodem nagenoeg op dezelfde hoogte liggen. Bij de variant die bovenstrooms aftakt is sprake van sedimentatie en de variant die benedenstrooms aftakt zorgt voor erosie in de nevengeul. Deze resultaten kunnen toegeschreven worden aan de nevengeulonttrekking (§5.5.1). Ook het resultaat met een meer benedenstrooms (dus achter in het kribvak) gelegen aftakking resulteert in meer sedimentatie in de hoofdgeul.



Verandering dwarsdoorsnede nevengeul en hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur 5-16. Verandering bodemligging in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor verschillende aftaklocaties in het kribvak. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.



Figuur 5-17. Bovenaanzicht dieptegemiddeld stroomsnelheidpatroon van varianten met verschillende aftaklocaties in het kribvak. De kleurschaal geeft de grootte weer, de grijze contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.

Een bovenaanzicht van de teweeggebrachte bodemveranderingen van varianten met verschillende aftaklocaties in het kribvak is weergegeven in Figuur 5-18. Hierin is goed te zien dat de instroomopening bij de variant die bovenstrooms aftakt de tendens heeft om op te schuiven in benedenstroomse richting. In Figuur 5-17 (§5.5.3) is goed te zien dat de stroomsnelheid bij de instroomopening beïnvloed wordt door de bovenstrooms gelegen krib. Er vindt hierdoor sedimentatie plaats aan de bovenstroomse kant van de inlaat en erosie aan de benedenstroomse oever van de inlaat. Dit leidt tevens tot een vergroting van de instroomopening, waardoor er een toename aan nevengeulonttrekking plaatsvindt in de eerste jaren na aanleg. Na enige tijd stagneert dit proces.

Ook de nevengeul die in het midden van een kribvak aftakt, leidt tot een kleine verbreding van de instroomopening. Ditmaal echter door erosieprocessen aan weerskanten van het instroompunt. De trechterwerking van de nevengeulinlaat zorgt voor een erosie bij beide instroomhoeken.

Daarnaast is de erosie benedenstrooms van de uitmonding het grootst bij de variant die benedenstrooms in het kribvak ontspringt. Dit is als verwacht, omdat deze variant het meeste water onttrekt.





Figuur 5-18. Bovenaanzicht sedimentatie- en erosiepatronen van varianten met verschillende aftaklocaties in het kribvak. Warme kleuren geven sedimentatie weer en koude kleuren erosie.

5.6. Breedte en diepte van de nevengeul

Het model dat binnen dit onderzoek is gebruikt, is dusdanig geprogrammeerd dat zowel de uiterwaard als de bodem van rivier- en nevengeul kan sedimenteren. Echter, enkel de rivier- en nevengeulbodem kunnen eroderen. Hiervoor is gekozen op advies van Sloff en Yossef (2012). Tijdens een persoonlijk gesprek gaven zij beiden aan dat erosie in uiterwaarden binnen het model nog niet de gewenste resultaten oplevert. Geotechnische processen spelen bij oevererosie een belangrijke rol, deze zijn echter nog niet in het model verwerkt. Op hun aanraden is de mogelijkheid tot eroderen van de uiterwaard binnen het gebruikte model uitgeschakeld. De gemodelleerde nevengeul kan daardoor niet breder worden door erosie, enkel smaller, als gevolg van sedimentatie. Het oevertalud kan wel veranderen; zowel eroderen als sedimenteren. Het basismodel heeft een breedte van 100 meter en een diepte van 3,5 meter. Zoals aangegeven in §4.4.1 zijn hierop breedtevariaties van 45 meter en 150 meter en dieptevariaties van 1 en 7 meter gemaakt. Deze paragraaf beschrijft de modelresultaten in dezelfde volgorde als de voorgaande paragrafen.

5.6.1. Nevengeulonttrekking

De evolutie van de nevengeulonttrekking voor de verschillende breedte- en dieptevarianten is weergegeven in Figuur 5-19. Hierin is duidelijk te zien dat wanneer het doorstroomprofiel van de nevengeul initieel kleiner is, er enige tijd nodig is om tot een evenwichtstoestand te komen. Dit heeft te maken met de interactie van de hydro- en morfodynamiek. Een kleinere nevengeulonttrekking leidt tot een kleinere transportcapaciteit en daardoor duurt het langer voordat de bodemveranderingen een evenwicht hebben bereikt. Tevens is in de figuur te zien dat de dieptevarianten de tendens hebben om in evenwichtscondities hetzelfde debiet te onttrekken. Later zal blijken dat dit komt doordat de evenwichtssituatie wordt bereikt door variaties in de diepte van de nevengeul (in plaats van de breedte). De piek in de 7m-grafiek is veroorzaakt door een initieel aanwezige sedimentbult voor de instroomopening. Deze blokkeert in eerste instantie een deel van de nevengeul. Pas wanneer deze is weggespoeld, stroomt er meer water de nevengeul in.



Figuur 5-19. Nevengeulonttrekking [m³/s] over een periode van 10 jaar bij varianten met verschillende nevengeulbreedtes en -dieptes.

5.6.2. Waterstandveranderingen

De waterstandstijging en –daling van de verschillende breedte- en dieptevarianten is gegeven in Figuur 5-20. De waterstandverandering in de hoofdgeul (deel parallel aan de nevengeul; gebied tussen verticale onderbroken lijnen in Figuur 5-20) is terug te leiden aan de nevengeulonttrekking (Figuur 5-19). Een grotere nevengeulonttrekking resulteert in een grotere waterstandstijging in de hoofdgeul. Hierbij hebben de dieptevarianten de tendens om naar dezelfde eindsituatie te evolueren.

Daarnaast zijn er twee opmerkelijke resultaten te zien in Figuur 5-19. Ten eerste lijkt de waterstandstijging in de moedergeul (bovenstrooms van de nevengeulaftakking; rivierkilometer 898-900) niet in verband te staan met de waterstandstijging in de hoofdgeul. De hoogste waterstandstijging in de moedergeul treedt niet op bij dezelfde variant als waar de hoogste waterstandstijging in de hoofdgeul optreedt. Dit kan worden verklaard door de combinatie van water en sedimentonttrekking en de simulatietijd. Allereerst leidt de wateronttrekking tot sedimentatie in de hoofdgeul en waterstandstijging. Ten tweede leidt de sedimentonttrekking door de nevengeul tot een bodemdaling en daarmee een waterstandverlaging. Ten derde zullen de modelsimulaties met een grotere onttrekking dichterbij de morfologische evenwichtssituatie zijn dan de andere simulaties.



Figuur 5-20. Breedtegemiddelde variatie van waterstand in de hoofdgeul (huidige waterstand minus waterstand zonder nevengeul) voor verschillende nevengeulbreedtes en -dieptes. De verticale onderbroken lijnen geven de af- en aantak locatie van de nevengeul weer.

5.6.3. Dieptegemiddelde stroomsnelheden

De dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn weergegeven in Figuur 5-21 en Figuur 5-22. Duidelijk is te zien dat een bredere nevengeul leidt tot verhoogde stroomsnelheden in de nevengeul zelf en lagere stroomsnelheden in de hoofdgeul. De verschillen in dieptegemiddelde stroomsnelheden bij de dieptevarianten komen door dat de evenwichtssituatie nog niet is bereikt. Uiteindelijk zullen deze drie varianten naar dezelfde evenwichtsdiepte evolueren en zullen de dieptegemiddelde stroomsnelheden hetzelfde zijn voor de dieptevarianten.



Figuur 5-21. Bovenaanzicht dieptegemiddeld stroomsnelheidpatroon van varianten met verschillende nevengeulbreedte. De kleurschaal geeft de grootte weer, de grijze contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.



Figuur 5-22. Bovenaanzicht dieptegemiddeld stroomsnelheidpatroon van varianten met verschillende nevengeuldiepte. De kleurschaal geeft de grootte weer, de grijze contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.

5.6.4. Bodemveranderingen

Figuur 5-24, bodemontwikkeling aan de hand van een dwarsprofiel, sluit aan bij de resultaten van de nevengeulonttrekking (§5.6.1). Duidelijk is te zien dat wanneer het doorstroomprofiel van de nevengeul initieel kleiner is (linker deelfiguren Figuur 5-24), de neven-/hoofdgeulsystemen enige tijd nodig hebben om tot een evenwichtstoestand te komen. De figuur geeft tevens het inzicht dat de evenwichtssituatie wordt bereikt door variaties in de diepte van de nevengeul (in plaats van de breedte). Dit zou verklaard kunnen worden met de modelbeperking dat enkel sedimentatie buiten de oevers van de nevengeul mag plaatsvinden (en geen erosie). De bovenaanzichtfiguren (Figuur 5-23) sluiten ook bij deze resultaten aan.

De evolutie van de smalste variant (breedte van 45 m) in Figuur 5-24 kan als volgt worden verklaard. De diepte in deze nevengeul neemt eerst sterk af, waarna hij weer langzaam toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door een hoeveelheid sediment die zich voor de ingang van de nevengeul bevindt bij de start van de simulatie. Dit sediment wordt in het eerste simulatiejaar de nevengeul in getransporteerd en verdeeld over de gehele lengte van de nevengeul. Vervolgens erodeert de nevengeul gestaag tot de evenwichtsdiepte is bereikt.



Bodemliggingverschil [m] tussen eind- en beginsituatie breedtevarianten

Figuur 5-23. Bovenaanzicht sedimentatie- en erosiepatronen van varianten met verschillende nevengeulbreedte (boven) en -diepte (onder). Warme kleuren geven sedimentatie weer en koude kleuren erosie.

Het basismodel en het model met een initiële nevengeuldiepte van 7 meter evalueren als volgt. Initieel is er een grotere erosiekuil bij de uitstroomopening (§5.2), die later deels wordt opgevuld door sedimentatie. Bij de dieptevariant van 1 meter is dit verloop anders. Bij deze variant neemt de nevengeulonttrekking enkel toe en daarmee ook de erosiekuil en de sedimentatie in de hoofdgeul.



Verandering dwarsdoorsnede nevengeul en hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur 5-24. Verandering bodemligging in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor verschillende breedte- en dieptevarianten. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel. Opm.: de piek in het dwarsprofiel van breedtevariant 45m is een modelleerfout, maar heeft geen invloed op de modelresultaten.

5.7. Instroomdrempel

In deze paragraaf zijn de hydro- en morfodynamische resultaten weergegeven van de modelsimulaties met verschillende instroom drempelhoogtes. In het basismodel is gekozen om geen drempel aan te leggen. Hierop zijn drie varianten gemaakt, met drempels van 1 m, 2 m, en 3 m hoog. Deze liggen respectievelijk -2.5 m, -1.5 m en -0.5 m ten opzichte van het uiterwaardniveau. Hogere drempels zijn niet meegenomen in de analyse omdat er dan bij het gekozen debiet ($Q=2360 \text{ m}^3/\text{s}$) geen water door de nevengeul stroomt. De resultaten worden in dezelfde volgorde besproken als de voorgaande paragrafen.

5.7.1. Nevengeulonttrekking

Zoals te verwachten valt, onttrekken nevengeulen minder water wanneer de instroomdrempel hoger is (Figuur 5-25 - links). Hierdoor wordt de evenwichtssituatie op andere momenten bereikt. Opvallend is het verschil in debietonttrekking. Tussen drempelvariant van 1m en het basismodel zit maar 6% verschil. Terwijl de invloed van de 2 m en de 3 m drempel veel drastischer zijn. Dit niet-lineaire verband (Figuur 5-25 - rechts) kan worden verklaard door een gecombineerd effect van evenwichtsdiepte en stroomsnelheden. In §5.7.4 zal namelijk blijken dat het evenwicht-bodemniveau van de nevengeul gelijk is voor het basismodel en het model met een instroom-drempelhoogte van 1 m. Naast dat dit doorstroomprofiel nagenoeg gelijk is voor beide modellen, zijn de stroomsnelheden boven de instroomdrempel hoger dan in de rest van de nevengeul (§5.7.3). Hierdoor wordt er meer water de nevengeul in getransporteerd.



Figuur 5-25. Links: Nevengeulonttrekking $[m^3/s]$ over een periode van 10 jaar bij varianten met verschillende drempelhoogtes [m]. Rechts: Niet lineair verband tussen de drempelhoogte en de nevengeulonttrekking.

5.7.2. Waterstandveranderingen

De waterstandstijging en – daling zijn weergegeven in Figuur 5-26. Hierin is goed te zien dat een hogere drempel leidt tot een kleinere stijging van de waterstand. Dit kan wederom worden verklaard door de grootte van de nevengeulonttrekking en de sedimentatie die dit tot gevolg heeft in de hoofdgeul.

Daarnaast is hetzelfde opmerkelijke resultaat te zien als in §5.6.2. De waterstandstijging in de moedergeul (bovenstrooms van de nevengeulaftakking; rivierkilometer 898-900) lijkt niet in verband te staan met de waterstandstijging in de hoofdgeul. De hoogste waterstandstijging in de moedergeul treedt niet op bij dezelfde variant als waar de

hoogste waterstandstijging in de hoofdgeul optreedt. Dit kan verklaard worden door de combinatie van water en sedimentonttrekking en de simulatietijd. Allereerst leidt de wateronttrekking tot sedimentatie in de hoofdgeul en waterstandstijging. Ten tweede leidt de sedimentonttrekking door de nevengeul tot een bodemdaling en daarmee een waterstandverlaging. Ten derde is zullen de modelsimulaties met een grotere onttrekking dichterbij de evenwichtssituatie zijn dan de andere simulaties.



Figuur 5-26. Breedtegemiddelde variatie van waterstand in de hoofdgeul (huidige waterstand minus waterstand zonder nevengeul) voor verschillende instroom-drempelhoogtes. De verticale onderbroken lijnen geven de af- en aantak locatie van de nevengeul weer.

5.7.3. Dieptegemiddelde stroomsnelheden

Figuur 5-27 presenteert de dieptegemiddelde stroomsnelheden in bovenaanzichten. Naast de verwachting dat er verlaagde stroomsnelheden in de nevengeul aanwezig zijn bij een hogere instroomdrempel, zijn ook verhoogde stroomsnelheden boven de instroomdrempel te zien. Deze zijn ongeveer 1 m/s hoger dan de stroomsnelheden in de nevengeul zelf. Deze kunnen verklaard worden met het effect van stuwkrommen.


Figuur 5-27. Bovenaanzicht dieptegemiddeld stroomsnelheidpatroon van varianten met verschillende instroom-drempelhoogte. De kleurschaal geeft de grootte weer, de grijze contourlijnen geven de contouren van het zomer- en winterbed weer, evenals de rivierkilometers.

5.7.4. Bodemveranderingen

door het reducerende De hoogte van de drempel heeft, effect de ор nevengeulonttrekking, een vrij groot effect op de bodemverandering in hoofd- en nevengeul (Figuur 5-28 en Figuur 5-29). Zo is er, in vergelijking met de drempelvariant van 1 m, bij de drempelvariant van 2 m ongeveer de helft aan sedimentatie in de hoofdgeul. Ook de erosie die in de hoofdgeul optreedt vlak na de uitmonding is bij de drempelvariant van 2 m vier maal kleiner. In de figuren is daarnaast duidelijk te zien dat de lage nevengeulonttrekking (§5.7.1) geen invloed heeft op sedimentatie of erosie in heet deel van de nevengeul dat parallel ligt aan de hoofdgeul.



Figuur 5-28. Bovenaanzicht sedimentatie- en erosiepatronen van varianten met verschillende instroomdrempelhoogtes. Warme kleuren geven sedimentatie weer en koude kleuren erosie.



Verandering dwarsdoorsnede nevengeul en hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur 5-29. Verandering bodemligging [m+NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor verschillende drempelvarianten. Zie Figuur 5-2 voor locatie dwarsprofiel.

Over het algemeen heeft de aanleg van een instroomdrempel als gevolg dat er direct na de aanleg sedimentatie optreedt in de nevengeul, net benedenstrooms van de drempel (Figuur 5-30)¹⁶. Dit is in de simulaties iets versterkt door de sedimentheuvel die initieel voor de ingang van de nevengeul aanwezig was (§5.2). Dit aandeel sedimentatie die vlak na de aanleg in de nevengeul optreedt, migreert in een later stadium als een sedimentatiegolf door de nevengeul. Tegelijkertijd treedt er erosie op in de hoofdgeul, bovenstrooms van de drempel. In de loop van de tijd neemt de erosie bovenstrooms van de drempel toe tot een bepaald evenwichtsniveau, waarna er ook erosie benedenstrooms van de drempel) blijft geleidelijk toenemen en breidt zich verder uit benedenstrooms in de nevengeul, tot de nevengeulbodem een evenwichtspositie heeft bereikt.



Figuur 5-30. Verandering van de bodemligging van de nevengeul t.o.v. de initiële bodemligging [m] voor verschillende jaren na aanleg, van drempelvariant 2m. Het water stroomt van rechts naar links.

¹⁶ Doordat Figuur 5-30 verschilplots van de bodemligging laat zien van hetzelfde model op verschillende tijdstappen en tijdstap 0, is de drempel niet meer gevisualiseerd.

5.8. Samenvatting en interpretatie

In voorgaande paragrafen zijn modelresultaten per variërende ontwerpparameter met elkaar vergeleken. Deze paragraaf vat de resultaten uit de voorgaande paragrafen samen in de bekende volgorde: nevengeulonttrekkingen (§5.8.1), waterstandveranderingen $(\S0)$, dieptegemiddelde stroomsnelheden $(\S0)$ en bodemveranderingen $(\S5.8.4)$. Per paragraaf wordt tevens een interpretatie van de resultaten geformuleerd en een vergelijking getrokken. In de laatste paragraaf (§5.8.5) wordt de consequentie voor nevengeulontwerp besproken. Hierbij ligt de focus op de beheeren onderhoudsinspanning die de implementatie van de nevengeulen met zich mee zouden brengen in termen van sedimentverplaatsing.

5.8.1. Nevengeulonttrekking

In Figuur 5-31 zijn de nevengeulonttrekkingen weergegeven die optraden na tien jaar simuleren met een afvoer van Q=2360 m³/s. Uit paragrafen 5.4 - 5.7 blijkt dat nog niet alle modelvarianten een evenwichtssituatie hebben bereikt binnen tien jaar. Daarom moet Figuur 5-31 met enige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.



Figuur 5-31. Indicatie nevengeulonttrekking 10 jaar na aanleg. De horizontale lijn geeft de nevengeulonttrekking voor het basismodel weer.

In Figuur 5-31 is goed te zien dat de grootste range in nevengeulonttrekking voor komt bij de bifurcatiehoek- en breedtevarianten. Daarnaast is de sterke invloed van de drempelhoogte op de wateronttrekking goed waarneembaar in de figuur. Het minste water wordt onttrokken bij de drempelvariant van 3 meter, het meeste water bij de bifurcatiehoekvariant van 20°.

5.8.2. Waterstandveranderingen

De waterstandverandering bij rivierkilometer 900 wordt verondersteld representatief te zijn om een indicatie te geven van het effect van de ontwerpparameters op deze waterstand (Figuur 5-32). Dit punt in de moedergeul ligt een halve kilometer bovenstrooms van de nevengeulaftakking en wordt representatief verondersteld omdat het waterstandverschil bovenstrooms van dit punt hier ongeveer gelijk aan is. Uit paragrafen 5.4 - 5.7 blijkt dat nog niet alle modelvarianten een evenwichtssituatie hebben bereikt binnen tien jaar. Daarom moet Figuur 5-31 met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden.

In Figuur 5-32 is te zien dat een variatie in de diepte geen invloed heeft op de waterstandverandering. Uit de resultaten in §5.6 bleek al dat de evenwichtssituatie wordt bereikt door variatie in de nevengeuldiepte. Hierdoor zullen de dieptevarianten uiteindelijk dezelfde diepte hebben en daardoor eenzelfde effect hebben op de waterstand in de hoofd- en moedergeul. Hieruit kan worden geconcludeerd dat een keuze voor een nevengeuldiepte overbodig is omdat de uiteindelijke diepte van de nevengeul een evenwichtsdiepte zal zijn.

Daarnaast valt op dat de drempelvariant van 2 meter leidt tot de grootste waterstandstijging. Dit kan als volgt worden verklaard: Er wordt meer water onttrokken dan bij de drempelvariant van 3 m. Dit zorgt voor meer sedimentatie in de hoofdgeul. Tegelijkertijd wordt er minder sediment onttrokken dan bij de drempelvariant van 1 m of het basismodel. Hierdoor blijft de bodem van de hoofdgeul hoger liggen. Als laatst zal de modelsimulatie met een grotere onttrekking dichterbij de evenwichtssituatie liggen dan de andere simulaties.



Indicatie van effect nevengeul-ontwerpparameters op waterstandverandering bij rivierkm. 900

Figuur 5-32. Indicatie waterstandverandering bij rivierkilometer 900, 10 jaar na aanleg. De horizontale lijn geeft de nevengeulonttrekking voor het basismodel weer.

Uit de figuur blijkt ook dat de bifurcatiehoek een groot effect heeft op de waterstand in de hoofd- en moedergeul. De grootste waterstandstijging vindt plaats bij de bifurcatiehoekvariant van 20° en de kleinste stijging bij de 90°-variant.

In Figuur 5-33 is de relatie weergegeven tussen de nevengeulonttrekking en de waterstandstijging. Bij de interpretatie van dit figuur moet onthouden worden dat nog niet alle modellen in evenwicht verkeren. In de figuur is goed te zien dat er geen lineaire relatie is tussen de nevengeulonttrekking en de waterstandverandering. Dit heeft te maken met het niet-lineaire verband tussen de stroomsnelheid en het sedimenttransport. De waterstandstijging wordt immers veroorzaakt door sedimentatie in de hoofdgeul.

Daarnaast blijkt uit de figuur dat de breedste nevengeul een kleiner waterstandverhoging heeft dan de bifurcatiehoekvariant van 20°, ondanks de grote hoeveelheid debiet die wordt onttrokken. Een verklaring zou kunnen zijn dat er ook een grotere hoeveelheid sediment wordt onttrokken.



Figuur 5-33. Indicatie van effect nevengeul-ontwerpparameters op relatie nevengeulonttrekking en waterstandverandering bij rivierkilometer 900, 10 jaar na aanleg.

Voor de aanleg van een waterstandverlagende nevengeul in tijden van hoogwater zou, op basis Figuur 5-33, een nevengeul met een grotere bifurcatiehoek, een bredere breedte, een drempel of een bovenstroomse aftakking het meest logisch zijn. Deze varianten zorgen voor de minste waterstandstijging bij grotere nevengeulonttrekkingen dan de andere varianten.

5.8.3. Dieptegemiddelde stroomsnelheden

De dieptegemiddelde stroomsnelheden zijn lastig samenvattend weer te geven en te vergelijken. Toch zullen de interpretaties van nevengeulonttrekkingen (§5.8.1), waterstandveranderingen (§0) en bodemveranderingen (§5.8.4) voldoende zijn om de consequenties te bepalen voor het ontwerpen van nevengeulen (§5.8.5).

5.8.4. Bodemveranderingen

De grootste sedimentatie/erosie-effecten per ontwerpparameter staan samengevat in Tabel 5-1. Het grootste euvel bij de aanleg van een nevengeul is de sedimentatie in een hoofdgeul die vervolgens gebaggerd moet worden om de Overeengekomen Laagste Rivierstand (OLR) te waarborgen. Uitleg over de bepaling van OLR is te vinden in bijlage D6.

/	Variant	Bifurcatie-	Aftaklocatie	Breedte en	Instroom-
Locatie		hoek		diepte	drempel
Jenl	algemeen	meer sedimentatie bij kleinere θ_b	meer sedimentatie bij meer bovenstrooms aftakken	meer sedimentatie bij bredere nevengeul	meer sedimentatie bij lagere drempel
	bovenstrooms bifurcatie	erosie neemt toe bij kleinere θ_{b}			erosie neemt toe bij hogere drempel
ofdę	benedenstrooms bifurcatie				
h	bovenstrooms monding		erosie neemt toe bij meer bovenstrooms aftakken		
_	benedenstrooms monding	meer erosie bij grotere θ_b		meer initiele erosie bij grotere diepte	
_	algemeen	diepte neemt toe bij grotere θ_{b}	diepte neemt toe bij meer benedenstrooms aftakken	diepte past zich aan de breedte aan	diepte neemt toe lagere drempel
_	bovenstroomse kant inlaat		erosie neemt toe bij meer benedenstrooms aftakken		
eul	benedenstroomse kant inlaat		erosie neemt toe bij meer bovenstrooms aftakken		
buənəu	benedenstrooms eerste binnenbocht			meer sedimentatie bij grotere breedte	
	benedenstrooms eerste buitenbocht			meer erosie bij grotere breedte	
	benedenstrooms tweede binnenbocht			meer sedimentatie bij grotere breedte	
	benedenstrooms tweede buitenbocht			meer erosie bij grotere breedte	

Tabel 5-1. Grootste sedimentatie/erosie-effecten per ontwerpparameter. De groene kolommen duiden de ontwerpparameters aan die de meest extreme consequenties hebben voor sedimentverplaatsing ten behoeve van beheer en onderhoud.

In Figuur 5-34 is een overzicht gegeven van de baggervolumes voor elke modelvariant na het modelleren van tien jaren. In deze figuren zijn het referentie- en basismodel weergegeven met een horizontale lijn. Uit deze grafiek en Figuur 5-31 kan worden geconcludeerd dat er een verband is tussen de nevengeulonttrekking en het baggervolume. Let hierbij op dat het baggervolume enkel is bepaald voor de vaargeul en niet voor de gehele hoofdgeul. De totale sedimentatie in de hoofdgeul zal daarom hoger zijn. Daarnaast is goed te zien dat bij elke variant baggerwerkzaamheden nodig zijn in de simulatieperiode van 10 jaar, zelfs bij het model zonder nevengeul (referentiemodel).

De twee parameters die de grootste range in baggerbezwaar laten zien, zijn de bifurcatiehoek en de nevengeulbreedte. Deze twee parameters hebben een grotere invloed op de morfodynamische processen dan de andere. De sedimentatieverschillen tussen de kleinste en de grootste bifurcatiehoek in de modeluitkomsten lopen zelfs op tot een halve meter (Figuur 5, Bijlage D1). Bij de aanleg van een nevengeul is het daarom erg belangrijk energie te steken in de juiste keuze van deze twee ontwerpparameters. Voor gekoppelde ontwerpparameters is het goed de parameter die een extremere invloed heeft als doorslaggevend te zien. Bij de loop van de nevengeul spelen bijvoorbeeld zowel de bifurcatiehoek als de plek van aftakken een rol. Het kan dan belangrijk zijn om de bifurcatiehoek als doorslaggevende parameter te nemen en de plek van aftakken in het kribvak iets aan te passen.

Daarnaast kan een drempelconstructie de beheer- en onderhoudinspanningen in de hoofdgeul het meest beperken. Bij de keuze voor een inlaatdrempel is echter preventief beheer nodig. Zo zal stortsteen rond de drempel moeten worden geplaatst.



Figuur 5-34. Indicatie baggervolume in vaargeul na een periode van 10 jaar.

5.8.5. Consequenties nevengeulontwerp

Een doel van deze studie is: het bepalen van het effect van ontwerpparameters voor de aanleg van nevengeulen op beheer- en onderhoudsinspanningen ter preventie van sedimentatie/erosieproblemen. Binnen dit onderzoek wordt het volume sediment dat moet worden gebaggerd om de vereiste vaargeuldiepte te behouden, representatief verondersteld voor de beheer- en onderhoudsinspanning. In deze paragraaf worden de consequenties besproken voor het ontwerp van nevengeulen.

In de aanleiding van dit onderzoek (§1.1) kwam naar voren dat er verschillende vuistregels zijn opgesteld voor nevengeulontwerp. De huidige vuistregels staan weergegeven in Tabel 1-1. In het kader van sedimentbeheer in hoofd- en nevengeul zijn hiervan de volgende vuistregels nuttig:

- Een minimale vaardiepte van 2.8 m onder OLR condities;
- Maximaal 5 dagen/jaar baggeren in een riviertraject van 15 km¹⁷;
- Afstand neven geul tot hoogwaterkeringen en/of kribwortel > 50 m en/of tot bandijk \sim 100 m;
- Dwars-stroomsnelheden in de hoofdgeul < 0.3 m/s bij volle nevengeul en < 0,15 m/s bij meestromend winterbed.

De eerste twee regels omvatten al voldoende richtlijn om uiteindelijk achtereenvolgens de maximale sedimentatie in de hoofd- en nevengeul, gemiddelde stroomsnelheden, de nevengeulonttrekking en de daarbij behorende ontwerpparameters te bepalen. De derde regel is van belang voor de werking van hoogwaterkeringen, kribben en bandijk. De laatste vuistregel is van belang voor de scheepvaart, maar kon juist ook veroorzaakt worden door de scheepvaart. Schepen kunnen hinder ondervinden van deze dwarsstromen maar wekken ook zelf dwars-stroming op. De dwars-stroomsnelheden opgewekt door de nevengeul, nemen toe naarmate de nevengeul meer water onttrekt (§5.3.2).

De volgende vuistregels zijn overbodig, omdat deze bepaald kunnen worden aan de hand van de vuistregels uit de hierboven genoemde vuistregels.

- Stroomsnelheid nevengeul ~0,3 m/s
- Gemiddelde sedimentatiesnelheid hoofdgeul: 1 3 cm/jaar en totale sedimentatie < 0,2 m;
- Wateronttrekking nevengeul < 3 % van zomerbedafvoer moedergeul;
- Diepte nevengeul 0,5 4 m;
- Locatie nevengeul in winterbed (Aftakken in buitenbocht, benedenstrooms in het kribvak en zo recht mogelijke geul);
- Bifurcatiehoek zo groot mogelijk;
- Shieldsparameter nevengeul < 0,03;
- Meestroomfrequentie nevengeul 9 maanden/jaar;
- Breedte nevengeul Waal 80 -150 m, Maas en Rijn 50 100 m en IJssel 40 80 m.

Op basis van deze studie zou er bij het ontwerpen van een nevengeul op vijf punten gelet moeten worden. Ten eerste kan geanalyseerd worden welk debiet afgetakt moet worden om waterstandverlaging tijdens hoogwater te verkrijgen. Daarnaast dient bij de constructie van de nevengeul in het achterhoofd worden gehouden dat bij gemiddelde afvoercondities baggerwerkzaamheden in de hoofdgeul recht evenredig zijn met de nevengeulonttrekking. Ten derde kan een drempelhoogte worden gekozen die de nevengeul op het juiste moment in werking laat treden. Ten vierde dient de nevengeul op evenwichtsdiepte, behorende bij de gekozen drempelhoogte en nevengeulbreedte (op basis van de gewenste debietonttrekking), aangelegd te worden. Tot slot is het belangrijk om bij gekoppelde ontwerpparameters (bijv. bifurcatiehoek en aftaklocatie in kribvak) de parameter die een extremere invloed heeft als doorslaggevend te zien.

¹⁷ De maximaal toegelaten hinder voor de scheepvaart bedraagt 5 dagen per jaar in een riviertraject van 15 km. Met modern materieel is het mogelijk om in die periode totaal 12.500 a 15.000 m³ sediment te baggeren op de Waal.

6 Resultaten variabele en constante afvoeren

In dit onderzoek zijn verschillende modelsimulaties gedaan (Schema 1, H4). Deze zijn opgedeeld in twee groepen. In hoofdstuk 5 werden de modelresultaten besproken waarbij het initieel ontwerp van de nevengeul varieert. Dit hoofdstuk presenteert de resultaten met focus op het bovenstrooms opgelegd debiet. Hiervoor zijn simulaties uitgevoerd met een variabele afvoer en acht verschillende constante afvoeren¹⁸, met het basismodel als beginconditie.

Dit hoofdstuk bestaat uit vier paragrafen. Eerst is kort uitgelegd hoe de figuren in dit hoofdstuk gelezen moeten worden (§6.1) en is een klassenindeling gepresenteerd (§6.2). In paragraaf 6.3 is de hydro- en morfodynamica besproken van de modelrun met de variabele afvoer. Paragraaf 6.4 presenteert de resultaten van de modelsimulaties met een constante afvoer.

6.1. Hoe de figuren te lezen

In dit hoofdstuk komen veelal dezelfde typen figuren voor om bodemveranderingen weer te geven. In deze paragraaf is uitgelegd hoe deze figuren gelezen moeten worden.

Bodemveranderingen zijn in dit hoofdstuk op twee manieren weergegeven. Allereerst als tweedimensionale verschilfiguren (bovenaanzichten). Deze figuren tonen altijd verschillen tussen eind- en begin bodemliggingen. Dit betekent dat indien het verschil positief is, er sprake is van sedimentatie. Negatieve waarden representeren erosie. Deze figuren bevatten niet het gehele modelgebied, maar enkel het deel waarin de hoofd- en nevengeul gelegen zijn. Ten tweede zijn bodemveranderingen weergegeven aan de hand van dwarsprofielen. De locatie van deze dwarsprofielfiguren is weergegeven in Figuur 5-3 (§5.1).

6.2. Klassenindeling

Er zijn vier situaties op hydrodynamisch gebied waarin een nevengeul kan verkeren, namelijk:

- 1) Er stroomt geen water door de nevengeul (links Figuur 6-1);
- 2) Water stroomt enkel door de hoofd- en nevengeul (midden Figuur 6-1);
- Water stroomt door de hoofdgeul, nevengeul en (deels) door de uiterwaard, omdat het water buiten de oevers van de nevengeul treedt¹⁹;
- 4) Water stroomt door de hoofdgeul, nevengeul en de uiterwaard, waarbij water vanuit de rivier over de zomerdijken de uiterwaard instroomt (rechts Figuur 6-1).

Afvoersimulaties kunnen onderverdeeld of ingedeeld worden in de bovengenoemde klassen. Zo is zowel elke quasistationaire stap uit de hydrograaf (Figuur 6-2) in te delen in een klasse (Tabel 6-1), als een modelsimulatie met een stationaire afvoer (Tabel 6-2). Er is gekozen om deze klassenindeling aan te houden, omdat duidelijk per klasse hydroen morfodynamische effecten kunnen worden onderscheden.

¹⁸ De variabele afvoer is gegeven in Figuur 6-2, de acht verschillende constante afvoeren zijn: 900 m³/s, 1400 m³/s, 1900 m³/s, 2360 m³/s, 2400 m³/s, 2900 m³/s, 3400 m³/s en 4650 m³/s.

¹⁹ Om te voorkomen dat het water de uiterwaard betreedt door het buiten de oevers treden van de nevengeul, kan een dijk rond de nevengeul geplaatst worden.



Figuur 6-1. Klasseindeling op hydrofynamisch gebied. Links: klasse 1; Midden: klasse 2; Rechts: klasse 4.

6.3. Variabele afvoer

Deze paragraaf presenteert de resultaten van een tienjarige modelsimulatie van het basismodel met een variabele afvoer (Figuur 6-2). De hydro- en morfodynamische ontwikkeling van de hoofdgeul, nevengeul en uiterwaard is hierbij besproken.



Figuur 6-2. Variabele afvoer van één jaar (van de tien gesimuleerde jaren); bovenstroomse randvoorwaarde van het model.

Wanneer gekeken wordt naar de evolutie van het dwarsprofiel van zowel de neven- als hoofdgeul, blijkt dat beide geulen vanaf jaar 3 elk jaar eenzelfde jaarlijkse ontwikkeling doorlopen (Figuur 16 bijlage E). De simulatietijd van 10 jaar is echter te kort om een dynamisch evenwicht te bereiken. In Figuur 5-31 is goed te zien dat de nevengeul de tendens heeft verder te eroderen en de hoofdgeul verder zal sedimenteren. Omdat de ontwikkeling zich jaarlijks herhaalt, ligt de focus binnen deze analyse op één jaar.



Figuur 6-3. Verandering bodemligging [m*NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul gedurende tien jaar, voor basismodelsimulatie met variabele afvoer. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

De morfodynamische processen in de hoofdgeul kunnen gevisualiseerd worden op een schaal van tientallen centimeters (Figuur 6-4). In de nevengeul is dit in de orde grootte van centimeters (Figuur 6-5).



Sedimentatie/erosie voor elke afvoerstap [m]

Figuur 6-4. Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) per quasistationaire tijdstap [m]. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

4.35 x 10 4.35 x 10 5 x 10 1e afvoerstap 2e afvoerstap 3e afvoerstap 4.35 0.2 0.2 0.2 y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] 0.1 0.1 0.1 4.345 4.345 0 4.345 -0.1 -0.1 -0.1 -0.2 -0.2 -0.2 4.34 4.34 4.34 1.73 × 10 1.73 × 10 1.73 x 10 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 x-coordinaat [m] x-coordinaat [m] x-coordinaat [m] x <u>10</u> 5 x 10 6e afvoerstap 4e afvoerstap 5e afvoerstap x 10 4.35 4.35 4.35 0.2 0.2 0.2 y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] 0.1 0.1 0.1 4.345 4.345 In. 4.345 -0.1 -0.1 -0.1 -0.2 -0.2 -0.2 4.34 4.34 1.73 × 10 4.34 1.73 x 10 1.73 x 10 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 x-coordinaat [m] x-coordinaat [m] x-coordinaat [m] 5 x 10 x 10 7e afvoerstap 8e afvoerstap 9e afvoerstap x 10 4.35 4.35 4.35 0.2 0.2 0.2 y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] y-coordinaat [m] 0.1 0.1 0.1 4.345 4.345 In . 4.345 -0.1 -0.1 -0.1 -0.2 -0.2 -0.2 4.34 4.34 4.34 1.73 × 10 1.73 × 10 1.73 × 10 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 1.71 1.715 1.72 1.725 x-coordinaat [m] x-coordinaat [m] x-coordinaat [m]

Sedimentatie/erosie voor elke afvoerstap [m] Bodemligging eind minus bodemligging begin quasistationaire stap

Figuur 6-5. Sedimentatie (rood) en erosie (blauw) in de nevengeul per quasistationaire tijdstap [m]. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Wanneer per quasistationaire tijdstap gekeken wordt naar de hydro- en morfodynamische modelresultaten (Figuur 6-4 en Figuur 6-5), dan verloopt een jaar als volgt:

- Q=900 m³/s: Er is sprake van uitvlakking van de bodem in de hoofdgeul. Bij deze afvoer stroomt er geen water door de nevengeul of uiterwaard.
- Q=2400 m³/s: Bovenstrooms van de eerste en benedenstrooms van de tweede bocht in de nevengeul vindt erosie plaats. In de rest van de nevengeul vindt sedimentatie plaats. In de hoofdgeul is een afwisselend patroon te herkennen van sedimentatie en erosie. Deze sedimentatie komt voor op de plekken die net zijn uitgevlakt tijdens de vorige tijdstap. Vooral de lokale sedimentatie net benedenstrooms van het bifurcatiepunt neemt flink toe. Er stroomt bij deze afvoer geen water over de uiterwaard.
- Q=2900 m³/s: Het proces in de hoofdgeul uit de voorgaande quasistationaire stap wordt versterkt. In de nevengeul treedt nu ook een afwisselend patroon van sedimentatie en erosie op. Waarbij sedimentatie bovenstrooms in de nevengeul de overhand heeft. Tevens wordt sediment afgezet buiten de oevers van de nevengeul, doordat de nevengeul buiten de oevers treedt.
- Q=4650 m³/s: Deze hoogste afvoer zorgt in de hoofdgeul voor een vergroting van de sedimentatie en erosie uit de vorige twee tijdstappen. Opmerkelijk is dat het afwisselende patroon mede in stroomrichting migreert. In de nevengeul wordt de plaatselijke sedimentatie bovenstrooms en erosie benedenstrooms versterkt. De sedimentatie die in de vorige afvoerstap buiten de oevers van de nevengeul opgestreden was, erodeert in deze stap weer. Bij deze afvoer stroomt er water over de uiterwaard. Deze stroming zorgt voor lichte erosie van het afgezette sediment buiten de oevers van de nevengeul in de vorige stap.
- Q=3400 m³/s: In zowel hoofd- als nevengeul sedimenteert nog meer sediment op de al hoger gelegen delen en erodeert nog meer sediment uit de lager gelegen delen. Het migrerende effect is ook hier aanwezig. Tevens wordt sediment afgezet buiten de oevers van de nevengeul, doordat de nevengeul buiten de oevers treedt.
- Q=2900 m³/s: Idem vorige quasistationaire stap.
- Q=1900 m³/s: Er vindt een zeer grote uitvlakking van de hoofd- en nevengeul plaats, met uitzondering van het meest benedenstroomse deel van de hoofdgeul. Er is duidelijk te zien dat de uitvlakking optreedt op locaties waar sterke sedimentatie en erosie was bij de afvoer Q=4650 m³/s. In het benedenstroomse deel van de hoofdgeul worden de bodemverschillen juist nog meer vergroot. Er stroomt bij deze afvoer geen water over de uiterwaard.
- Q=1400 m³/s: In deze quasistationaire stap wordt juist het meest benedenstroomse deel van de hoofdgeul uitgevlakt. De bodemvormen in het midden van de moedergeul blijven echter migreren. De nevengeul zelf erodeert tot de bodem gelijk is aan de situatie in het begin van het jaar. Er stroomt bij deze afvoer geen water over de uiterwaard.
- Q=900 m³/s: Net als in de eerste stap is er sprake van uitvlakking van de bodem in de hoofdgeul. Bij deze afvoer stroomt er geen water door de nevengeul of uiterwaard.

Op hydrodynamisch gebied kan de klassenindeling aangehouden worden als gepresenteerd in §6.2 (Tabel 6-1). Dat er geen morfodynamisch effect is in de nevengeul bij de laagste afvoer, komt doordat er geen water door de nevengeul stroomt. De nevengeulbodem is door sedimentatieprocessen zodanig ver omhooggekomen, dat het water belemmerd wordt de nevengeul in te stromen bij de laagste afvoer. Hierdoor

behoort de quasistationaire afvoerstap Q=900 m³/s tot klasse 1. Bij de afvoeren Q=1400 m³/s - Q=2400 m³/s volgt het water de loop van de nevengeul en treed niet buiten de oevers (klasse 2). Zodra de afvoer van Q=2900 m³/s of Q=3400 m³/s door het model stroomt, treedt de nevengeul buiten de oevers en stroomt het water de uiterwaard in (klasse 3). De hoogste afvoer (Q=4650 m³/s) zorgt vervolgens voor het volledig vollopen van de uiterwaard, doordat het water over de zomerdijken stroomt (klasse 4). De stroomsnelheden in de nevengeul blijven hoger dan in de rest van de uiterwaard. Het water dat vanuit de uiterwaard bovenstrooms bij de nevengeul komt, volgt netjes de loop van de nevengeul (Figuur 6-6).

Quasistationaire stap [#]	Debiet, Q [m³/s]	Duur [dagen]	Klasse (§6.2)
1 ^e	900	54	1*
2 ^e	2400	23	2
3 ^e	2900	6	3
4 ^e	4650	8	4
5 ^e	3400	6	3
6 ^e	2900	7	3
7 ^e	1900	51	2
8 ^e	1400	159	2
9 ^e	900	51	1*

Tabel 6-1. Overzicht afvoeren uit quasistationaire afvoerbenadering (Figuur 6-2) per quasistationaire stap. *Bij de initieel opgelegde bodem (4 m*NAP) had er wel water door de nevengeul gestroomd. De bodem van de nevengeul is echter tijdens de inspeelperiode omhooggekomen, waardoor het water bij Q=900 m³/s wordt belemmerd de nevengeul in te stromen.



Figuur 6-6. Dieptegemiddelde stroomsnelheid rond de nevengeul. De kleurschaal geeft de grootte van de dieptegemiddelde stroomsnelheid weer [m/s]. Een grotere pijl staat voor een hogere stroomsnelheid. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

6.4. Constante afvoeren

In §6.2 is een klassenindeling gemaakt. §6.3 bespreekt de hydro- en morfodynamische ontwikkeling die de hoofd- en nevengeul doorlopen bij een modelsimulatie doorgerekend met een variabele afvoercurve. Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de modelsimulaties met een constante afvoer. Deze simulaties zijn uitgevoerd om de representatieve constante afvoer op morfodynamisch gebied te bepalen (§7.4.2). De acht stationaire modelsimulaties zijn ingedeeld naar klasse als gedefinieerd in §6.2 (Tabel 6-2). Deze paragraaf is opgebouwd aan de hand van deze klassen.

Debiet, Q [m³/s]	klasse
900	1
1400	1*
1900	2
2360	2
2400	2
2900	3
3400	3
4650	4

Tabel 6-2. Klassenindeling stationaire modelsimulaties. *Deze indeling wijkt af t.o.v. de quasistationaire klassenindeling door een modelleerfout¹⁴.

Algemeen geldt dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid in de nevengeul altijd hoger is dan boven de uiterwaard. De stroming ondervindt boven de nevengeul minder weerstand, waardoor de stroomsnelheden hoger liggen.

6.4.1. Klasse 1: enkel water door hoofdgeul

Bij de gekozen afvoeren zou de situatie dat er geen water door de nevengeul wordt onttrokken, niet voor moeten komen. Echter, door een modelleerfout²⁰ bij de afvoeren van Q=900 m³/s en Q=1400 m³/s, stroomt in deze twee simulaties geen water door de nevengeul. Een voordeel is dat deze modelsimulaties daarom kunnen worden gehanteerd als simulatieklasse 1.

Interessant binnen deze klasse is de ontwikkeling van de hoofdgeulbodem (Figuur 6-7). De evenwichtsituatie is eerder bereikt bij Q=1400 m³/s. Tevens zorgt deze hogere afvoer voor een extremer bodempatroon, waarbij t.o.v. Q=900 m³/s meer sediment geërodeerd is in de buitenbocht en juist meer gesedimenteerd in de binnenbocht. Bij het debiet Q=900 m³/s is de bodem in de hoofdgeul het meest vlak. Dit kan duiden op een substantieel zwakkere spiraalstroming.



Figuur 6-7. Verandering bodemligging [m⁺NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor stationaire afvoeren uit klasse 1. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

²⁰ De nevengeul was niet verbonden met de hoofdgeul.

6.4.2. Klasse 2: water door hoofd- en nevengeul

In klasse 2 zitten Q=1900 m³/s, Q=2360 m³/s en Q=2400 m³/s. Bij de eerste afvoer stroomt het water netjes om de kribben heen en zijn neren te herkennen in elk kribvak. Daarnaast volgt het water de loop van de nevengeul en treedt deze niet buiten de oevers. Bij Q=2400 m³/s stroomt het water hier en daar al over de kribhoofden heen. Daarnaast zijn twee neren te herkennen in het kribvak bij de monding van de nevengeul (Figuur 6-8). Dat deze niet aanwezig zijn bij Q=1900 m³/s, kan verklaard worden met de stroomsnelheden op punt van interesse. Bij Q=2400 m³/s hebben de stroomsnelheden van de *nevengeul* de overhand bij de monding, bij Q=1900 m³/s is dit juist de stroming die vanuit de *hoofdgeul* het kribvak instroomt.



Figuur 6-8. Ontwikkeling dubbele neer in kribvak bij monding nevengeul, voor de stationaire afvoeren $Q=2360 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q=2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Binnen deze klasse lijkt een hoger opgelegd stationair debiet te resulteren in een hogere nevengeulbodemligging (Figuur 6-9). Q=1900 m³/s resulteert in een zowel een lagere ligging van de nevengeul- als de hoofdgeul-bodem.



Figuur 6-9. Verandering bodemligging [m*NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor stationaire afvoeren uit klasse 2. Gekozen is om het figuur voor Q=2360 m³/s niet te laten zien, omdat deze gelijk is aan die van Q=2400 m³/s. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

6.4.3. Klasse 3: water in uiterwaard door buiten oever tredende nevengeul

De stationaire modelsimulaties met Q=2900 m³/s en Q=3400 m³/s vertegenwoordigen klasse 3. Het water stroomt bij deze afvoeren geheel over de kribben heen. Daarnaast treedt de nevengeul buiten de oevers en stroomt het water de uiterwaard in (Figuur 6-10). Toch volgt de grootste hoeveelheid afvoer de loop van de nevengeul. Op tijdstap 0 van de simulatie (wanneer enkel de hydrodynamica is gestabiliseerd), is goed te zien dat het water uitwaaiert over de uiterwaard (Figuur 6-10). Een kleiner gedeelte van het debiet dat door de nevengeul wordt onttrokken, verlaat de uiterwaard ook via de monding van de nevengeul. Een deel van het water stroomt namelijk verder de uiterwaard in (Figuur 6-11), richting de benedenstroomse modelrand (Figuur 4-5; $\S4.3.3$).



Figuur 6-10. Dieptegemiddelde stroomsnelheid rond het bifurcatiepunt. Het water treedt buiten de oevers en waaiert uit over de uiterwaard. De kleurschaal geeft de grootte van de dieptegemiddelde stroomsnelheid weer [m/s]. Een grotere pijl staat voor een hogere stroomsnelheid.



Figuur 6-11. Dieptegemiddelde stroomsnelheid rond de nevengeul. De kleurschaal geeft de grootte van de dieptegemiddelde stroomsnelheid weer [m/s]. Een grotere pijl staat voor een hogere stroomsnelheid.

Vrij snel vindt er sedimentatie plaats in de eerste binnenbocht en buiten de oever van de nevengeul, waar het uitwaaierende water het sediment verspreidt. Naar mate de tijd vordert migreert de sedimentatie, die plaatsvond in de nevengeul, meer benedenstrooms (Figuur 6-12). De sedimentatie die eerst bovenstrooms van de eerste binnenbocht te vinden was, blijft benedenstrooms van deze binnenbocht hangen. Door de sedimentatieprocessen wordt het water gedwongen om vanaf het bifurcatiepunt in één rechte lijn door te stromen, buiten de oevers, de uiterwaard in. Hierdoor vindt er enkel erosie plaats in het meest bovenstroomse deel van de nevengeul.

Verandering in bodemligging [m] bij Q=3400 m³/s



Figuur 6-12. Evolutie bodemligging van de nevengeul t.o.v. de initiële bodemligging [m] voor verschillende jaren na aanleg, van stationair debietvariant Q=3400 m³/s. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Binnen deze klasse leidt een hoger opgelegd stationair debiet tot een extreem hogere nevengeulbodemligging (Figuur 6-13). De nevengeul is bij Q=3400 m³/s geheel aangezand. Daarnaast is de hoofdgeul in het geheel hoger komen te liggen, maar zijn de bodemvormen extremer (sedimentatie in binnenbocht, erosie in buitenbocht). Zelfs in de kribvakken is sprake van sedimentatie. Dit kan worden verklaard door de stromingen die door de kribvakken, over de dijk heen, de uiterwaard instromen. Het aangevoerde sediment wordt bepaald met de opgelegde transportrandvoorwaarde ($\S4.3.5$). Deze houdt in dat de bovenstroomse modelrand niet kan eroderen of sedimenteren. Hierdoor is er vanzelf een sedimentflux op de modelrand wanneer gerekend wordt met een hogere afvoer. Verder valt op dat het evenwicht bij Q=2900 m³/s eerder wordt bereikt.



Figuur 6-13. Verandering bodemligging [m*NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor stationaire afvoeren uit klasse 3. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

6.4.4. Klasse 4: water in uiterwaard over dijk

Klasse 4 is vertegenwoordigd door Q=4650 m³/s. Vanaf het moment dat de simulatie start heeft deze afvoer direct veel effect op de morfodynamica. Alle morfodynamische processen vinden plaats op een veel kortere tijdschaal. Er migreert een erosiegolf door het domein, als gevolg van de bovenstrooms opgelegde transportrandvoorwaarde (§4.3.5 en §6.4.3). Er vindt vrij veel erosie plaats in de buitenbochten van de moedergeul, en sedimentatie in de binnenbochten (Figuur 6-14). Dit wordt teweeggebracht door spiraalstroming.



Figuur 6-14. Verandering bodemligging [m+NAP] in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor stationaire afvoer uit klasse 4. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

Doordat deze bodemveranderingen vrij snel optreden, ontstaan onder meer extremere veranderingen op hydrodynamisch gebied. Het water stroomt over de zomerdijken de uiterwaard in. Het meegevoerde sediment settelt zich in de uiterwaard (Figuur 6-15). In de uiterwaard zijn verschillende ruwheden aanwezig (door verschil in landgebruik), waardoor een soort vlechtend patroon in de uiterwaard ontstaat. Deze vlechtende sedimentatiegolf migreert door de uiterwaard heen en resulteert uiteindelijk in het dichtslibben van de nevengeul (Figuur 6-15 en Figuur 6-16). De extreme hydro- en morfodynamische interactie die plaatsvindt bij de 10 jaar lange simulatie met deze afvoer, is nauwelijks waarneembaar in de simulatie met variabele afvoer. Dit komt door de korte tijdsperiode van acht dagen, waarin het vlechtende patroon geen kans krijgt te ontstaan.

In hoofdstuk 7 is aan de hand van de resultaten uit dit hoofdstuk het effect van uiterwaardstroming besproken en bediscussieerd wat het representatieve debiet is voor de variabele afvoer.



Figuur 6-15. Evolutie bodemligging van de nevengeul t.o.v. de initiële bodemligging [m] voor verschillende jaren na aanleg, van stationair debietvariant Q=4650 m3/s. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Figuur 6-16. Sediment dat met het water meegetransporteerd is over de dijk, slaat eerder neer op locaties met een hogere ruwheid. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west). Boven: luchtfoto projectlocatie (Google, 2012). Onder: De kleurschaal geeft de bodemligging weer [m⁺NAP]. De pijlen presenteren de dieptegemiddelde stroomsnelheid; een grotere pijl staat voor een hogere stroomsnelheid.

7 Discussie

In dit hoofdstuk komen een aantal discussiepunten aan bod. Allereerst zijn de discussiepunten behandeld die met het model te maken hebben, zoals modelbeperkingen (§7.1) en leemte in modelkennis (§7.2). Daarna (§7.3) worden de punten bediscussieerd die gerelateerd zijn aan de resultaten van hoofdstuk 5 (*Resultaten variatie in initiële* condities). Vervolgens (§0) worden de resultaten van hoofdstuk 6 (*Resultaten variabele en constante afvoeren*) bediscussieerd. Waarbij eerst dieper wordt ingegaan op uiterwaardstroming bij een variabele afvoer (§7.4.1) en vervolgens op de representatieve constante afvoer (§7.4.2).

7.1. Modelbeperkingen

Doordat een model een versimpeling van de werkelijkheid is, moeten de resultaten een ondersteunende functie (in plaats van bepalende) hebben. Om hierin inzicht te krijgen, zijn in deze paragraaf de meest belangrijke modelbeperkingen onder elkaar gezet.

7.1.1. Spiraalstroming

Spiraalstroming zit in het model verwerkt met de zogeheten spiraalstromingsmodule. Hierbij wordt de spiraalstroming geparamteriseerd als een stromingscomponent loodrecht op de dieptegemiddelde hoofdstroom (bijlage B3). Deze stromingscomponent hang af van de stroomlijnkromming. Dit werkt direct door op de morfodynamiek in het model, omdat de richting van de bodemschuifspanning hierdoor mede veranderd. Beiden worden meegenomen in de advectie-diffusie vergelijkingen door (1) een extra advectie-diffusie vergelijking en (2) een extra term in de momentenvergelijkingen voor de horizontale advectieve schuifspanning (opgewerkt door de spiraalstroming). De basis van deze parameter is dus evenwichtsstroming. Voor meer informatie over spiraalstroming zie Bijlage B3.

7.1.2. Rivierbodemvormen

Het model rekent met een zogenoemde duingemiddelde bodem. Dit houdt in dat duinmigratie niet als dusdanig in het model verwerkt zit. De rivierduinen zullen namelijk in dezelfde orde van grootte zijn als de bodemvariaties teweeggebracht door variatie in ontwerpparameters. Gezien dit onderzoek juist de effecten van deze ontwerpparameters in oogschouw neemt, is gekozen om de verstorende factor van rivierduinen niet mee te nemen in de simulaties. Tevens zijn de roostercellen dusdanig groot, dat er in de eerste stappen van de simulatie een herverdeling plaats vindt van de vrij gedetailleerde initieel ingevoerde bodemligging (multi-beam metingen). Zie Figuur 7-1.

7.1.3. Wervelingen

Roostercellen zijn binnen dit onderzoek te grof om een neer te kunnen modelleren in hetzelfde kribvak als waar de nevengeulbifurcatie gelegen is. Oplossingen voor dit modelleerprobleem zouden kunnen zijn: het gebruiken van de functie 'Horizontal Large Eddy Simulation' (HLES), het toepassen van een variabele eddy (wervel) viscositeit eddy diffusiviteit of driedimensionaal modelleren. Voor vervolgonderzoek wordt aangeraden deze oplossingen te implementeren.



Bodemliggingverschil [m] referentiemodel minus initiële bodemligging

Figuur 7-1. Boven: cumulatieve sedimentatie en erosie na 10 jaar [m]; kleurenschaal: positief geeft aan dat de bodem hoger ligt (sedimentatie), negatief lager (erosie).Onder: bodemliggingverschillen bij aangegeven dwarsdoorsnede tussen initiële bodemligging (blauwe lijn) en referentiemodel (zwarte lijn). Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

7.1.4. Oevererosie

De details van oevererosie zijn momenteel nog niet goed te modelleren. Hierbij spelen namelijk ook geotechnische processen een rol, welke nog niet in het model verwerkt zijn.

7.1.5. Tweedimensionaal

Stromingsprocessen die driedimensionaal een rol spelen, zoals een neer of wervelingen, worden niet goed gemodelleerd door de keuze om tweedimensionaal te modelleren. Tevens is de eddy viscositeit constant verondersteld, welke bij deze processen ook een rol zou spelen. Wanneer toch belang is bij een inzicht in deze processen, zou het aanzetten van de 'Horizontal Large Eddy Simulations'-functie een mogelijkheid zijn. Binnen deze studie is dit echter buiten beschouwing gelaten.

7.1.6. Trapsgewijze oever nevengeul

Doordat het huidige rooster enkel opgebouwd kon worden uit gestructureerde roostercellen (rechthoekige vormen), is gekozen om de oevers van de nevengeul trapsgewijs te modelleren. Dit heeft als gevolg dat smallere nevengeulen dan 45 m onrealistische resultaten geven, doordat de oevers op regelmatige afstanden te dicht bij elkaar liggen. De gekozen oevers hebben geen invloed op de dieptegemiddelde stroomsnelheden, welke de (realistische) loop van de nevengeul blijven volgen.

Momenteel ontwikkelt Deltares een nieuwe Delft3D-versie waarin een gestructureerde kromlijning rooster gecombineerd kan worden met een ongestructureerd rooster (met vormen als driehoeken). Dit biedt grote perspectieven voor toekomstig onderzoek van onder anderen nevengeulstudies, waarbij de aansluitingen realistischer gemodelleerd kunnen worden.

7.1.7. Domeinlengte van het model

Het opgestelde model bevat geen informatie verder benedenstrooms dan 300 meter van de uitmonding. Voor het weglaten van dit vrij belangrijke stuk domein is gekozen om de simulatietijd te verkorten. Hierdoor kan, voor dit gebied, geen terugkoppeling worden gemaakt naar vondsten uit eerdere studies (bijvoorbeeld de alternerende banken die Van Putten, 2011, verkreeg).

7.1.8. Schematisatie instroomdrempel

De drempel is binnen het model weergegeven als een niet erodeerbare bodem. De breedte van deze drempel is gelijk aan de breedte van de nevengeul. Daarnaast is de drempel één roostercel dik (10 meter). Dit is geen realistische afmeting van een instroomdrempel. Toch is hiervoor gekozen, omdat de enige andere optie het plaatsen van een overlaat was. Het nadeel van een overlaat binnen het model is dat het wel sediment door laat. Dit wordt als een groter nadeel gezien dan een te brede instroomdrempel.

7.2. Leemte in modelkennis

Bij het modelleren is het zaak de roosterlijnen zo goed mogelijk de oevers te laten volgen. Op deze manier wordt namelijk voorkomen dat er grote verschillen in bodemligging of waterdiepte aanwezig zijn binnen één roostercel. Dit heeft als gevolg dat de concentratie roostercellen bij rivierbochten in de binnenbocht hoger is dan in de buitenbocht. Doordat de opeenvolgende roostercellen onder een kleine hoek van elkaar liggen, zijn de roostercellen bijna rechthoekig. Daarnaast verschillen de roostercellen in grootte, doordat de concentratie roostercellen verschilt per locatie (binnenbocht versus buitenbocht). Hierbij is het mede van belang dat de afstand tussen twee roosterlijnen nagenoeg gelijk is aan de afstand met de naburige roosterlijnen.

Ondanks dat tijdens het modelleren aan bovenstaande modelcriteria werd voldaan en het Courantgetal voldeed aan de eis (§4.3.6 en Bijlage C), zijn vele aanpassingen aan het modelrooster²¹ gedaan voordat het model numeriek stabiel was. De dieptegemiddelde stroomsnelheid weergegeven in Figuur 7-2, geeft goed inzicht in de instabiliteit die optrad in de eerste maanden van het onderzoek. In vele simulaties is geprobeerd deze instabiliteit uit het model te krijgen. Hierbij is getracht het fenomeen te verklaren door het verwijderen van kribben, het drastisch verkleinen van het Courantgetal, het aanpassen van viscositeitparameters, boven- en benedenstroomse randvoorwaarden. Dit alles bleek geen invloed te hebben.

²¹ Hierbij kan gedacht worden aan het plaatselijk grover/fijner maken van de roostercellen, het verkleinen van de hoek tussen opeenvolgende roostercellen, de op/aflopende afstand tussen opeenvolgende roosterlijnen nog meer geleidelijk te laten plaatsvinden, de oriëntatie van de roostercellen veranderen en de lengte/breedte-verhouding van de roostercellen aanpassen.



Figuur 7-2. Numerieke instabiliteit: fluctuatie van de dieptegemiddelde stroomsnelheid dwars op de stroomrichting.

Doordat ook experts op het gebied van hydro- en morfodynamiek de fluctuatie in dieptegemiddelde stroomsnelheid niet konden verklaren, is besloten het modelrooster opnieuw op te bouwen. Het probleem was toen verholpen. Een directe verklaring voor het werken van het model is er niet. Ondanks dat er een duidelijk verschil is tussen het werkende en de niet werkende modellen, zijn experts het oneens of dit verschil de verklaring is voor de opgetreden fluctuaties in dieptegemiddelde stroomsnelheid. Het verschil tussen de modellen heeft te maken met de oriëntatie van de nagenoeg rechthoekige roostercellen (Figuur 7-3). Binnen het werkende model is de oriëntatie van de roostercellen gelijk aan de stroomrichting, wat niet het geval is bij het numeriek instabiele model. Dit houdt mede in dat de roostercellen bij het bifurcatiepunt van de nevengeul vierkant zijn doordat de stroomrichting hier twee kanten op kan gaan (richting hoofd- of nevengeul).



Figuur 7-3. Mogelijke stabiliteitseis aan numeriek stromingsmodel. In het numeriek stabiele model kwam enkel de oriëntatie van de roostercel voor in lengterichting op de stroomsnelheid.

De oriëntatie van de nagenoeg rechthoekige roostercellen ten opzichte van de stroomrichting zou als volgt een verband kunnen hebben met de stabiliteit van het

model: Een model is numeriek instabiel wanneer de berekende waarden tussen opeenvolgende simulatietijdstippen of roostercellen sterk verschillen. Bijvoorbeeld een bodemligging of een waterniveau dat sterk verschilt per opeenvolgende roostercel of tijdstap. Wanneer de oriëntatie van de roostercel in de stroomrichting is, zijn er minder extreme schommelingen in bijvoorbeeld bodemligging en waterniveau te vinden; de lokale verschillen worden hierdoor iets uitgemiddeld. Zoals gezegd verschillen experts van mening over deze verklaring, daarom is vervolgonderzoek aanbevolen.

7.3. Effect variatie in initiële condities (ontwerpparameters)

De resultaten uit hoofdstuk 5 worden in deze paragraaf vergeleken met de opgestelde hyptheses (H3) en de literatuur (H2). Eerst wordt ingegaan op het algemene effect van een nevengeulimplementatie, waarna de effecten worden besproken per gevarieerde ontwerpparameter.

7.3.1. Algemeen effect aanleg nevengeul

Vijf fenomenen uit de literatuur en hypotheses komen naar voren in de modelresultaten (§5.3). Daarnaast is er één hypothese die niet bevestigd kan worden.

Ten eerste is de discussie zeer interessant die momenteel in de literatuur te vinden is over het effect van een nevengeul op de waterstand in de hoofdgeul. Zowel Ribberink (2010) als Van Putten (2011) geven aan dat de implementatie van een nevengeul kan leiden tot waterstandverhoging. Dit klopt voor situaties waarbij de waterstandverlaging door de toename in doorstroomoppervlak niet compenserend is voor de waterstandverhoging door verandering van de bodemligging in de hoofdgeul. Toch zijn er wel degelijk situaties waarbij de implementatie van de nevengeul zorgt voor waterstandverlaging. Dit hangt af van zowel het debiet van de rivier als van de dimensies van de nevengeul (Schema 4 bijlage D1). Wanneer een nevengeul met de juiste dimensies aangelegd wordt om in tijden van hoogwater te zorgen voor waterstandverlaging, kan het zijn dat dit resulteert in een kleine waterstandverhoging tijdens lagere waterstanden. Een nevengeul is in dat geval productief; de implementatie zorgt immers voor het gewenste effect in tijden van hoogwater. De besproken theorie van Ribberink (2010) veronderstelt dat het verhang van de waterlijn in langsrichting gelijk is aan het verhang van de bodem, en houdt daardoor geen rekening met de opgetreden stuwkromme, veroorzaakt door de sedimentatie in de hoofdgeul. Positief is, dat wanneer in de theorie van Ribberink (2010) ook rekening wordt gehouden met de stuwkromme, de waterstandverhoging lager zal uitvallen dan wanneer deze parallel wordt verondersteld aan de bodem.

Ten tweede laten de modelresultaten zien dat een evenwichtssituatie nog niet bereikt is. De modelsimulatie is uitgevoerd voor een periode van 10 jaar. Voor morfologische veranderingen is deze tijdschaal vrij kort. De grootste bodemveranderingen zijn binnen deze tijdsduur echter al wel opgetreden. Ook Figuur 7-4 laat duidelijk zien dat een evenwichtssituatie nog niet is bereikt. Na 10 jaar is het verhang van de waterlijn in langsrichting nog steeds kleiner dan het verhang van de bodem. Er zou opgemerkt kunnen worden dat de modelsimulatie hierdoor de bevindingen van Bulle (1926) bevestigt, maar naar verwachting zullen de experimenten van Bulle ook geen evenwichtssituatie hebben bereikt.



Figuur 7-4. Blauw: Kleine waterstandverhoging basismodel t.o.v. referentiemodel, bij implementatie basisnevengeul met gekozen stationair debiet van Q=2360m³/s. Groen: Verandering in bodemligging basismodel t.o.v. referentiemodel; gedurende 10 jaar na aanleg. Focus op hoofdgeul. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Ten derde komen de modelresultaten overeen met de bevindingen van Bulle (1926) dat er een dwarsverhang aanwezig is bij de aftakking, waarbij het waterniveau in de binnenbocht lager staat dan in de buitenbocht. Dit fenomeen is zo sterk dat het de waterstand in het desbetreffende kribvak mede beïnvloedt. Normaliter is de waterstand bovenstrooms in het kribvak hoger dan benedenstrooms in het kribvak. Dit wordt echter verstoord door de middelpuntsvliedende kracht die optreedt in de aftakkende bocht.

Daarnaast komen de resultaten overeen met de verwachting dat de debietafname door de onttrekking van de nevengeul leidt tot een afname van de transportcapaciteit in de hoofdgeul, waardoor sedimentatie plaatsvindt in de hoofdgeul.

Het vijfde fenomeen wat teruggekoppeld kan worden is die van de erosiekuil in de hoofdgeul. Van Putten (2011) gaf aan dat er direct na aanleg in de hoofdgeul een erosiekuil ontstaat, benedenstrooms van de nevengeul. Deze conclusie is mede bevestigd door de modelresultaten binnen dit onderzoek. Echter, volgens Van Putten blijft deze kuil ongeveer één jaar liggen, waarna deze benedenstrooms migreert, wat met de modelresultaten van dit onderzoek niet bevestigd kon worden.

De hypothese van Van Putten (2011) over alternerende banken kan niet worden getest, omdat het gebied waar Van Putten alternerende banken detecteerde niet meegenomen is in de modelsimulaties (§7.1.7). Van Putten (2011) concludeert dat enkel de aanleg van een nevengeul leidt tot het ontstaan van alternerende banken benedenstrooms van de nevengeul. Deze banken migreren verder stroomafwaarts, waarna na enkele jaren vaste banken worden ontwikkeld. Aanbevolen wordt om een benedenstroomse uitbreiding van het model te maken, zodat deze hypothese zou kunnen worden getest.

7.3.2. Bifurcatiehoek

De modelresultaten komen overeen met de hypothese dat een kleinere bifurcatiehoek leidt tot een gemakkelijkere debietonttrekking van de nevengeul. Of het Bulle-effect inderdaad een verwaarloosbaar effect heeft op de sedimentverdeling tussen hoofd- en nevengeul moet blijken uit extra driedimensionale modelsimulaties. Een driedimensionale modelstudie kan namelijk inzicht geven in het aandeel sediment dat de nevengeul in wordt getransporteerd als gevolg van spiraalstroming.

Echter, er is wel een tegenstrijdigheid met de hypotheses binnen een andere studie. Uit de modelresultaten blijkt ook dat de spiraalstroming rond de krib benedenstrooms van de bifurcatie toe neemt bij een kleinere bifurcatiehoek. Dit is tegenstrijdig met de hypothese die Mosselman, Jagers en Schijndel (2004) trekken. In het rapport *Optimalisatie inlaat nevengeul* van Mosselman et al. (2004) staat niet verwoord waarom zij juist verwachten dat een kleinere bifurcatiehoek leidt tot minder uitschuring van de benedenstrooms gelegen krib. Vervolgonderzoek met een driedimensionaal model zal nodig zijn om een beter inzicht in de hydro- en morfodynamische processen rond kribben te krijgen. Hierin zal de bifurcatiehoek moeten variëren bij een benedenstroomse aftakking in het kribvak.

Uit de resultaten bleek dat de nevengeulonttrekkingen bij de bifurcatiehoeken van 45° en 70° maximaal 6% van elkaar verschillen. Dit zou kunnen duiden op een range van bifurcatiehoeken waarbinnen de nevengeulonttrekking minder extreem wordt beïnvloed dan buiten deze range. Zoals genoemd heeft een variatie in bifurcatiehoek invloed op de lengteverhouding van neven- en hoofdgeul, waarbij het verschil in lengteverhouding klein is tussen de 45°- en de 70°-variant ten opzichte van de andere varianten. Het is interessant om in vervolgonderzoek een gedetailleerder gevoeligheidsanalyse uit te voeren van de invloed van de bifurcatiehoek op de nevengeulonttrekking.

7.3.3. Plek van aftakken in het kribvak

De hypothese, gebaseerd op de studie van Mosselman et al. (2004), is dat een nevengeul die bovenstrooms in het kribvak aftakt zorgt voor sedimentatie bij de benedenstroomse kant van de inlaat en oevererosie bij de bovenstroomse kant (Figuur 3-1 en Figuur 3-2, pag. 14). Bij een nevengeul die benedenstrooms in het kribvak aftakt werden sterkere stromen verondersteld rond de benedenstrooms van de bifurcatie gelegen krib.

De modelresultaten komen niet met de hypotheses overeen. Dit komt waarschijnlijk doordat het model tweedimensionaal is en de resultaten van Mosselman et al. (2004) gebaseerd zijn op driedimensionale modelresultaten. In de modelresultaten is geen neer in het kribvak, waar de nevengeul aftakt, aanwezig (wat bij Mosselman et al., 2004, wel het geval was). Binnen deze studie stroomt het water direct vanuit de hoofdgeul de nevengeul in en maakt niet eerst een bocht door het kribvak. Deze andere aanstroomroute brengt ook andere morfodynamische gevolgen met zich mee. Daardoor vindt op de plek waar sedimentatie werd verwacht (bij de benedenstroomse kant van de inlaat), nu juist erosie plaats. Ook rond de benedenstrooms gelegen krib vindt in geen van de varianten sterkere stroming plaats. Dit kan worden verklaard met de afmetingen van de roostercellen. Zoals genoemd (§7.1.3) zijn deze binnen dit onderzoek te grof om een neer te kunnen modelleren in hetzelfde kribvak als waar de nevengeulbifurcatie is gelegen.

7.3.4. Nevengeulbreedte en -diepte

In deze deelparagraaf is eerst een terugkoppeling gemaakt naar de voorkeur van Gerritsen en Schropp (2010) om een nevengeul diep en smal te maken, waarna ingegaan is op de hypothese.

Gerritsen en Schropp (2010) geven aan dat er minder sediment aanslibt in de nevengeul bij een smallere, diepere nevengeul (het sediment moet hierdoor een langere weg afleggen om te settelen). Binnen deze studie kon deze uitspraak niet worden getest. De eerste reden hiervoor is dat het doorstroomoppervlak (Breedte nevengeul * diepte nevengeul) niet constant gehouden is in deze studie. Ten tweede kon door een beperking van het model de nevengeul niet in de breedte eroderen. Daarom wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek te kijken naar het effect van de breedte/diepte-verhouding in plaats van de breedte en diepte afzonderlijk te onderzoeken.

Het model bevestigt de hypothese van alternerende banken niet. Verondersteld was dat bij een breedte/diepteverhouding tussen de 20 en 40 alternerende banken ontstaan. Het basismodel valt midden in deze range en de breedtevariant van 150 m valt er net buiten. De overige breedte- en dieptevarianten vallen er ruim buiten. Bij geen van de varianten zijn alternerende banken gesimuleerd. Dit komt doordat niet alleen de breedte/diepteverhouding relevant is voor alternerende banken. Ook de macht in de transportformule en de zogenoemde interactieparameter tussen de aanpassingslengte van stroming en morfologie spelen een rol (Verbruggen, Numerical nonlinear analysis of alternate-bar formation under super-resonant conditions, 2012) (Struiksma et al., 2010).

7.3.5. Instroomdrempel

Zoals aangegeven in hoofdstuk 0 werd verwacht dat een nevengeul die meer debiet onttrekt sneller de evenwichtssituatie zou bereiken. Dit wordt bevestigd door de resultaten. Bij de 1 m, 2 m, en de basisvariant traden morfodynamische veranderingen op. Hierbij is te zien dat de variant met een instroomdrempel van 1 m en het basismodel rond dezelfde tijd een evenwicht bereiken, waarbij ongeveer hetzelfde debiet wordt onttrokken. Bij de drempelvariant van 2 m, waarbij minder debiet wordt onttrokken, wordt geen evenwicht bereikt binnen de simulatieperiode van 10 jaar.

Daarnaast was de verwachting dat er een hoeveelheid sedimentatie op zou treden benedenstrooms van de drempel (Gerritsen & Schropp, 2010). Een drempel zorgt immers voor een beperking van de debietonttrekking, waardoor de stroomsnelheden in de nevengeul af zullen nemen (het doorstroomprofiel blijft immers gelijk) en de waterdiepte in de nevengeul lager zal zijn dan de situatie zonder drempel. Dit heeft tot gevolg dat het sediment sneller neer slaat. Uit de resultaten blijkt inderdaad dat het grootste deel van de nevengeul op morfodynamisch gebied enkel wordt beïnvloed door de grootte van de nevengeulonttrekking, welke weer afhangt van de drempelhoogte. De bodem van de nevengeul komt hoger te liggen wanneer er minder water onttrokken wordt, mits er überhaupt water onttrokken wordt. Hoogtes in de orde van grootte van de drempel zelf worden hierbij niet bereikt. Rond de inlaatdrempel treden wel degelijk morfodynamische veranderingen op die er zonder drempel niet zijn. Hierbij wordt zowel boven- als benedenstrooms van de drempel sediment geërodeerd, als gevolg van de lokaal verhoogde stroomsnelheden en uitschuring (Ribberink, River dynamics II: Transport processes and morphology, 2010).

7.4. Effect variabele en constante afvoeren

De resultaten uit hoofdstuk 6 worden in deze paragraaf vergeleken met de opgestelde hyptheses (H3). Eerst wordt ingegaan op uiterwaardstroming bij een variabele afvoer (§7.4.1), de representatieve constante afvoer wordt bediscussieerd (§7.4.2).

7.4.1. Variabele afvoer en uiterwaardstroming

In deze paragraaf is de terugkoppeling gepresenteerd van de modelresultaten met een variabele afvoer (§6.3) met de geformuleerde hypothese (§3.2). De zelfgeformuleerde hypothese sluit aan bij de hypothese van Klop (2009), met daarbij de toevoeging van het fenomeen doorspoeling²² bij de lagere afvoeren. Klop (2009) formuleerde het zogenoemde dwars/parallelstroming-principe. Waarbij hij sedimentatie voorspelde in de delen van de nevengeul die dwars op de stroomrichting liggen.

Het uitspoelen²⁰, als benoemd in de hypothese, treedt op. Namelijk, bij de conditie waarbij geen uiterwaardstroming plaatsvindt (klasse 2; §6.2). Echter, niet de gehele hypothese gaat op. Verwacht werd dat de nevengeul het volgende effect zou hebben op de uiterwaardenstroming die dwars over de nevengeul stroomt: De verdieping bij de nevengeul wordt door het water ondervonden als een groter doorstroomoppervlak en leidt tot een lagere stroomsnelheid. Dit heeft een lagere sedimenttransportcapaciteit tot gevolg. De nevengeul kan dan gezien worden als een sedimentvang. Dit proces kwam echter niet naar voren uit de modelsimulaties. Dit kan te maken hebben met de vegetatie in de uiterwaard. De uiterwaard heeft hierdoor geen alluviale mobiele bodem. Daardoor is er geen sedimenttransport over de uiterwaard. In de delen van de nevengeul die dwars vindt juist stroomrichting staan, erosie plaats, door de hogere op de onttrekkende/afvoerende stromen die daar plaatsvinden.

De afvoeren die zo hoog zijn dat ze buiten de oevers van de nevengeul treden (klasse 3; §6.2) leiden tot sedimentatie in het deel van de nevengeul dat parallel aan de hoofdgeul ligt. Dit komt door het volgende proces. De afvoer is dusdanig groot dat het buiten de oevers van de nevengeul treedt. Zodra het water de kans krijgt, waaiert het bij deze afvoer uit over de uiterwaard. Hierdoor stroomt er meer water door het bovenstroomse deel van de uiterwaard, dan door het deel dat parallel aan de hoofdgeul stroomt. Hierdoor sedimenteert dit deel van de nevengeul. De iets lagere afvoeren (waarbij het water niet buiten de oevers treedt, klasse 2; §6.2) erodeert deze sedimentatie weer. Dit is de voorspelde doorspoeling.

Ook in de uiterwaard, bovenstrooms van de nevengeul is sedimentatie te vinden. Dit sediment is daar neergeslagen op het moment dat de nevengeul buiten de oevers trad (klasse 3; §6.2). Hierdoor verlagen de lokale stroomsnelheden en slaat het sediment neer in de uiterwaard, net bovenstrooms van de nevengeul.

Oeverwalafzetting is in dit model niet te zien, omdat de roostercellen van het model daar te groot voor zijn.

7.4.2. Representatieve constante afvoer

Deze paragraaf beschrijft de analyse van de representatieve constante afvoer op morfodynamisch gebied. Dit is gedaan door een vergelijking van de resultaten van

²² Verwacht wordt dat er sedimentatie plaats vindt in de nevengeul bij de hogere afvoeren (waarbij het water ook over de uiterwaarden stroomt). Bij lagere afvoeren wordt verwacht dat deze sedimentatie weer wegerodeert uit de nevengeul. Dit fenomeen wordt binnen dit onderzoek doorspoeling genoemd.

simulaties met constante afvoer (§6.46.3) en de resultaten van simulaties met een variabele afvoer (§6.3).

Representatieve afvoer is de stationaire afvoer die de (werkelijke) afvoercurve het best benadert. Wanneer het enkel mogelijk is (door beperking van model of tijd), met één stationaire afvoer te rekenen, kan gekozen worden voor deze representatieve afvoer. De representatieve afvoer is al bekend voor modelsimulaties van enkel een rivier (dus zonder nevengeul). Dit is de afvoer die leidt tot het jaarlijks gemiddeld sedimenttransport. Echter, voor modelsimulaties waarin een nevengeul aanwezig is, is de representatieve afvoer nog niet bekend. Verwacht werd dat dit de afvoer zal zijn waarbij de nevengeul geheel gevuld is (oevervullend voor de nevengeul). Dit is ook de reden geweest om de modelsimulaties uit het vorige hoofdstuk (H6) met een oevervullende afvoer (Q=2360 m3/s) te modelleren.

Uit de modelresultaten blijkt dat de bodemveranderingen in de *nevengeul* bij een stationair debiet het best overeenkomen met de bodemresultaten van de quasistationaire benadering vlak na het hoogwater. De bodemveranderingen van de *hoofdgeul* worden echter het best benaderd aan het eind van een laagwater periode.

De resultaten laten zien dat een representatieve stationaire afvoer, om een afvoercurve te benaderen, niet bestaat. Zowel doorspoeling als sedimentatie/erosie in de uiterwaarden kan hierdoor namelijk niet worden gemodelleerd. Wanneer er toch een keuze gemaakt zou moeten worden, dan zou de hoofdgeul binnen dit onderzoek het best benaderd worden met de Q=2360 m³/s of Q=2400 m³/s –afvoer (Figuur 7-5). Een tien jaar durende simulatie met deze afvoer komt het dichtst bij de tien jaar durende simulatie met deze afvoer komt het dichtst bij de tien jaar durende simulatie hebben bereikt. Voor de nevengeul lijken de resultaten aan te tonen dat de tijdsgemiddeld gekozen afvoer van 1547 m³/s (voor berekening zie Bijlage D) de beste stationaire benadering. Echter, zoals gezegd representeert een stationaire afvoer de curve niet voldoende. De belangrijke processen doorspoeling en erosie/sedimentatie in uiterwaarden komen hierbij dan namelijk niet terug. Aanbevolen wordt te onderzoeken hoeveel quasistationaire stappen er minimaal nodig zijn om een curve goed te representeern.



Figuur 7-5. Dwarsprofiel van bodemligging [m*NAP] na tien jaar voor basismodelsimulatie met variabele afvoer (zwarte lijn) en best representerende constante afvoeren. Zie Figuur 5-3 voor locatie dwarsprofiel.

8 Conclusie

Dit onderzoek heeft als doel te adviseren over modellering van nevengeulen en nevengeulen ontwerpparameters voor de aanleg van om beheeren preventie onderhoudsinspanningen ter van sedimentatie/erosieproblemen te minimaliseren. In dit hoofdstuk is eerst kort ingegaan op de mogelijkheid om nevengeulen te modelleren in het huidige Duurzame Vaardiepte Rijndelta model (DVRmodel). Daarna zijn de conclusies over de invloed van de vijf ontwerpparameters op de hydrodynamiek, morfodynamiek en de baggerwerkzaamheden puntsgewijs behandeld. Afgesloten is met een conclusie ten aanzien van de huidige nevengeulontwerprichtlijnen.

8.1. Nevengeulen modelleren in Duurzame Vaardiepte Rijndelta Model

Het is mogelijk een nevengeul te implementeren in het DVR-model. Doordat de nevengeulen meestal gepland worden in de grotere uiterwaarden kan er in het model gewerkt worden met grote roostercellen. Dit heeft als voordeel dat de simulatietijd aanzienlijk wordt verkort. Daarnaast heeft een trapsgewijs oeververloop sowieso geen effect op de simulatie bij het modelleren met roostercellen van 7m x 20m of groter. Het is belangrijk de roostercellen nagenoeg vierkant te modelleren op locaties waar de stroomrichting veel verandert.

Geconcludeerd kan worden dat er geen stationaire afvoer bestaat die de beste keuze is voor een benadering van een afvoercurve, wanneer morfodynamische veranderingen in de *nevengeul* moeten worden gemodelleerd. Binnen dit onderzoek is de afvoer Q=1900 m^3/s voor een simulatieperiode van 10 jaar de beste stationaire benadering van een afvoercurve. Echter, twee belangrijke fenomenen worden bij de keuze voor een stationaire afvoer niet gesimuleerd. De eerste is het fenomeen doorspoeling. Het tweede is het ontbreken van morfodynamisch inzicht in de sedimentatie net buiten de oevers van de nevengeul.

8.2. Invloed parameters op Hydro- en morfodynamiek

Deze paragraaf presenteert eerst de algemene conclusies over de hydro- en morfodynamische gevolgen van een nevengeul, ongeacht de gekozen nevengeuldimensies. Daarna is per ontwerpparameter²³ samengevat wat het effect is op de hydro- en morfodynamiek.

8.2.1. Algemeen

Ten eerste is er geen lineair verband tussen de nevengeulonttrekking en de waterstandverandering. Dit heeft te maken met het niet-lineaire verband tussen de stroomsnelheid en het sedimenttransport. De waterstandstijging wordt immers veroorzaakt door sedimentatie in de hoofdgeul.

Verder wordt het effect op de waterstand beïnvloed door drie componenten. De combinatie van deze drie componenten kan zowel leiden tot een waterstand*verhoging* als *-verlaging*. Waterstand*verlaging* ontstaat ten eerste door de wateronttrekking van de nevengeul. Waterstand*verlaging* ontstaat ten tweede door sedimentonttrekking van de nevengeul. Daardoor daalt namelijk de bodem in de hoofdgeul en daarmee daalt ook de waterstand. Waterstand*verhoging* wordt veroorzaakt door de debietafname in de hoofdgeul (door de onttrekking van de nevengeul), waardoor de transportcapaciteit in de hoofdgeul afneemt en als gevolg sedimentatie plaatsvindt in de hoofdgeul. Een

²³ In het onderzoek is gekeken naar het effect van de ontwerpparameters bifurcatiehoek, plek van aftakken in het kribvak, nevengeulbreedte, nevengeuldiepte en inlaatdrempel.

waterstandverlaging wordt dus verkregen als de waterstandverlaging door de debiet- en sedimentonttrekking groter is dan de waterstandverhoging door verandering van de bodemligging in de hoofdgeul. Wanneer een nevengeul met de juiste dimensies wordt aangelegd om in tijden van hoogwater te zorgen voor waterstandverlaging, kan het zijn dat dit resulteert in een kleine waterstandverhoging tijdens lagere waterstanden. Een nevengeul is in dat geval productief: de implementatie zorgt immers voor het gewenste effect in tijden van hoogwater.

Uit de resultaten blijkt dat voor de aanleg van een waterstandverlagende nevengeul in tijden van hoogwater, het best kan worden gekozen voor een nevengeul met een grotere bifurcatiehoek, een bredere breedte, een drempel of een bovenstroomse aftakking. Deze varianten zorgen voor de minste waterstandstijging bij grotere nevengeulonttrekkingen dan de andere varianten.

Daarnaast ontstaat er benedenstrooms van de bifurcatiehoek een sedimentatiegebied aan dezelfde oever van de hoofdgeul als waar de nevengeul aftakt. Dit sedimentatiegedrag repeteert langs de oever van de hoofdgeul waar de nevengeul aantakt. In de eerste bocht van de nevengeul vindt ook sedimentatie plaats. Dit komt door spiraalstroming. In de hoofdgeul, bij de monding van de nevengeul, vindt lokale erosie plaats door het samenkomen van de waterstromen uit hoofd- en nevengeul.

Als laatst blijkt uit de resultaten dat er een rechtevenredig verband is tussen de nevengeulonttrekking en het baggervolume.

8.2.2. Bifurcatiehoek

Opgemerkt moet worden dat een variatie in bifurcatiehoek mede invloed heeft op de lengteverhouding die de neven- en hoofdgeul met elkaar hebben. Hierdoor kunnen de ondergenoemde effecten niet met zekerheid alleen worden toegeschreven aan de variatie van de bifurcatiehoek.

Voor het effect van de bifurcatiehoek op de nevengeulonttrekking kunnen een aantal zaken worden geconcludeerd. Ten eerste resulteert een kleinere bifurcatiehoek in een grotere debietonttrekking door de nevengeul. Ten tweede komt de grootste range in nevengeulonttrekking voor bij de bifurcatiehoekvariant. Het verschil in nevengeulonttrekking tussen de bifurcatiehoekvariant van 20° en 90° is in dit onderzoek 250 m³/s. Ten derde verschillen de nevengeulonttrekkingen bij de bifurcatiehoeken van 45° en 70° maximaal 6%. Dit duidt op een range van bifurcatiehoeken waarbinnen de nevengeulonttrekking minder extreem wordt beïnvloed dan buiten deze range.

Daarnaast heeft de bifurcatiehoek een groot effect op de waterstand in de hoofd- en moedergeul. De grootste waterstandstijging vindt plaats bij de bifurcatiehoekvariant van 20° en de kleinste stijging bij de 90°-variant.

Verder leidt een kleinere bifurcatiehoek tot verhoogde spiraalstroming in de bochten van de nevengeul en rond de benedenstroomse krib. Tot slot geldt voor de bifurcatiehoek dat:

- Een kleinere bifurcatiehoek resulteert in een sterke reductie van de transportcapaciteit in de hoofdgeul.
- De erosie vlak na de monding van de nevengeul (in de hoofdgeul) is sterker wanneer de bifurcatiehoek kleiner is.
- Een kleinere bifurcatiehoek leidt tot een diepere nevengeul.
• De bifrucatiehoek is één van de twee parameters die de grootste range in baggerbezwaar laten zien. De sedimentatieverschillen tussen de kleinste en de grootste bifurcatiehoek in de modeluitkomsten lopen zelfs op tot een halve meter.

8.2.3. Plek van aftakken in het kribvak

Wat betreft de plek van aftakken in het kribvak geldt allereerst dat de grootste nevengeulonttrekking optreedt bij de variant die benedenstrooms in het kribvak aftakt. De variant die bovenstrooms in het kribvak aftakt onttrekt juist de kleinste hoeveelheid. Ten tweede leidt de variant die bovenstrooms in het kribvak aftakt tot minder extreme sedimentatie/erosie-patronen. Tot slot zorgt de nevengeul die bovenstrooms in het kribvak aftakt voor erosie bij de benedenstroomse kant van het bifurcatiepunt. Dit is in strijd met de beweringen van Mosselman et al. (2004) die op deze locatie juist sedimentatie vonden. Een mogelijke verklaring voor het verschil in uitkomsten is dat de resultaten van Mosselman et al. (2004) gebaseerd zijn op driedimensionale modelresultaten, terwijl binnen deze studie tweedimensionaal gemodelleerd is. Binnen deze studie stroomt het water direct vanuit de hoofdgeul de nevengeul in en maakt niet eerst een bocht door het kribvak. Deze andere aanstroomroute brengt ook andere morfodynamische gevolgen met zich mee. Daardoor vindt op de plek waar sedimentatie werd verwacht (bij de benedenstroomse kant van de inlaat), nu juist erosie plaats.

8.2.4. Nevengeulbreedte en -diepte

De keuze in nevengeulbreedte beïnvloedt de nevengeulonttrekking sterk. Het verschil in nevengeulonttrekking tussen de breedtevariant van 45 m en 150 m is in dit onderzoek ruim 200 m³/s. Uit de breedte- en dieptesimulaties blijkt daarnaast dat wanneer het doorstroomprofiel van de nevengeul initieel kleiner is, de nevengeul/hoofdgeul-systemen langer tijd nodig hebben om tot een evenwichtstoestand te komen.

Verder werd gevonden dat de breedste nevengeul leidt tot een kleinere waterstandverhoging dan de bifurcatiehoekvariant van 20°, ondanks de grote hoeveelheid debiet dat onttrokken wordt. Dit komt doordat de breedtevariant een grotere hoeveelheid sediment onttrekt. Een variatie in de diepte heeft blijkt juist geen invloed te hebben op de waterstandverandering. De evenwichtssituatie wordt immers bereikt door variatie in de nevengeuldiepte.

Uit de resultaten blijkt dat de nevengeulbreedte één van de twee parameters is die de grootste range in baggerbezwaar laten zien. Bij de breedste variant zal zeven keer zoveel gebaggerd moeten worden als bij de smalste variant.

Als laatst kan geconcludeerd worden dat het model de hypothese (bij een breedte/diepteverhouding tussen de 20 en 40 worden alternerende banken verwacht) niet bevestigd. Dit komt doordat niet alleen de breedte/diepte-verhouding relevant is voor alternerende banken. Ook de macht in de transportformule en de zogenoemde interactieparameter tussen de aanpassingslengte van stroming en morfologie spelen een rol (Verbruggen, Numerical nonlinear analysis of alternate-bar formation under super-resonant conditions, 2012) (Struiksma et al., 2010).

8.2.5. Instroomdrempel

Allereerst geldt dat de drempelhoogte een sterke invloed heeft op de wateronttrekking van de nevengeul. Van de drempelvarianten leidt de 2 m -variant tot de grootste waterstandstijging. Dit kan worden verklaard doordat meer water wordt onttrokken dan bij de drempelvariant van 3 m. Dit zorgt voor meer sedimentatie in de hoofdgeul. Tegelijkertijd wordt er minder sediment onttrokken dan bij de drempelvariant van 1 m of

het basismodel. Hierdoor blijft de bodem van de hoofdgeul hoger liggen. Als laatst zal de modelsimulatie met een grotere onttrekking dichterbij de evenwichtssituatie zijn dan de andere simulaties.

De aanleg van een instroomdrempel heeft tevens een groot effect op de morfodynamiek in de nevengeul. Een instroomdrempel kan daarom als een belangrijke ontwerpparameter worden gezien om de waterstandverlaging in de hoofdgeul te reguleren. Er is minder aanzanding in de hoofdgeul, doordat de nevengeul later mee stroomt. Hierbij heeft de hoogte van de drempel effect op de nevengeulonttrekking en daarmee de mate van sedimentatie in de hoofdgeul. Uiteraard wordt een evenwichtsituatie later bereikt bij een hogere drempel.

Kort na aanleg van een drempel ontstaat benedenstrooms van de drempel eerst flinke sedimentatie, welke vervolgens als een sedimentgolf door de nevengeul migreert. Vervolgens ontstaat er een erosiekuil net benedenstrooms van de drempel welke in omvang door de jaren heen toeneemt. Daarnaast vindt bovenstrooms van de instroomdrempel juist erosie plaats, tot een bepaald evenwicht is bereikt.

Concluderend kan een drempelconstructie de beheer- en onderhoudinspanningen in de hoofdgeul het meest beperken. Bij de keuze voor een inlaatdrempel is echter preventief beheer nodig. Zo zal stortsteen rond de drempel moeten worden geplaatst.

8.3. Consequenties nevengeulontwerprichtlijnen

Vanuit het oogpunt van beheer- en onderhoudsinspanningen zijn veel van de huidige vuistregels overbodig. Voorbeelden zijn het opleggen van nevengeulafmetingen, maximale onttrekkingen of maximale sedimentatiehoogten. Het is logischer om de regels aan te houden met betrekking tot de minimaal gegarandeerde vaardiepte en de maximaal toegestane baggerwerkzaamheden. In het kader van sedimentbeheer in hoofden nevengeul zijn de volgende vuistregels nuttig:

- 1. Een minimale vaardiepte van 2.8 m onder OLR condities;
- 2. Maximaal 5 dagen/jaar baggeren in een riviertraject van 15 km²⁴;
- 3. Afstand neven geul tot hoogwaterkeringen en/of kribwortel > 50 m en/of tot bandijk ~ 100 m;
- 4. Dwars-stroomsnelheden in de hoofdgeul < 0.3 m/s bij volle nevengeul en < 0,15 m/s bij meestromend winterbed.

De eerste twee regels omvatten al voldoende richtlijn om uiteindelijk achtereenvolgens de maximale sedimentatie in de hoofd- en nevengeul, gemiddelde stroomsnelheden, de nevengeulonttrekking en de daarbij behorende ontwerpparameters te bepalen. De derde regel is van belang voor de werking van hoogwaterkeringen, kribben en bandijk. De laatste vuistregel is van belang voor de scheepvaart, maar kon ook juist veroorzaakt worden door de scheepvaart. Schepen kunnen hinder ondervinden van deze dwarsstromen, maar wekken ook zelf dwars-stroming op. De dwars-stroomsnelheden opgewekt door de nevengeul, nemen toe naarmate de nevengeul meer water onttrekt.

²⁴ De maximaal toegelaten hinder voor de scheepvaart bedraagt 5 dagen per jaar in een riviertraject van 15 km. Met modern materieel is het mogelijk om in die periode totaal 12.500 a 15.000 m³ sediment te baggeren op de Waal.

9 Aanbevelingen

De aanbevelingen zijn onderverdeeld in drie groepen en zijn elk in een andere paragraaf besproken. Ten eerste (§9.1) zijn er aanbevelingen voor nevengeulontwerpers, ten tweede (§9.2) voor nevengeulmodelleurs en ten derde (§0) voor vervolgonderzoek.

9.1. Aanbevelingen voor nevengeulontwerp

Een doel van deze studie is: het bepalen van het effect van ontwerpparameters voor de aanleg van nevengeulen op beheer- en onderhoudsinspanningen ter preventie van sedimentatie/erosieproblemen. In deze paragraaf worden de aanbevelingen besproken die voor het ontwerp van nevengeulen, gebaseerd op het minimaliseren van de beheeren onderhoudsinspanning.

Op basis van deze studie wordt aanbevolen bij het ontwerpen van een nevengeul op vijf punten te letten. Ten eerste kan worden geanalyseerd welk debiet afgetakt moet worden om de gewenste waterstandverlaging tijdens hoogwater te verkrijgen. Daarnaast dient bij de constructie van de nevengeul in het achterhoofd worden gehouden dat baggerwerkzaamheden de hoofdgeul recht evenredig in zijn met de nevengeulonttrekking tijdens gemiddelde afvoercondities. Ten derde kan een drempelhoogte worden gekozen die de nevengeul op het juiste moment in werking laat treden. Ten vierde dient de nevengeul op evenwichtsdiepte, behorende bij de gekozen drempelhoogte en nevengeulbreedte (op basis van de gewenste debietonttrekking), aangelegd te worden. Tot slot kan, wanneer de loop van de nevengeul gebonden is door omliggende constructies, prioriteit worden gesteld aan de juiste bifurcatiehoek en nevengeulbreedte.

9.1.1. Vuistregels

In de aanleiding van dit onderzoek (§1.1) kwam naar voren dat er verschillende vuistregels opgesteld zijn voor nevengeulontwerp. De huidige vuistregels staan weergegeven in Tabel 1-1, welke in deze paragraaf worden bediscussieerd. Achtereenvolgens wordt aanbevolen welke vuistregels gebruikt moeten blijven worden en welke niet meer meegenomen hoeven te worden bij het ontwerpen van een nevengeul.

Belangrijke vuistregels

In het kader van sedimentbeheer in hoofd- en nevengeul zijn de volgende vuistregels nuttig:

- Een minimale vaardiepte van 2.8 m onder OLR condities;
- Maximaal 5 dagen/jaar baggeren in een riviertraject van 15 km²⁵;
- Afstand neven geul tot hoogwaterkeringen en/of kribwortel > 50 m en/of tot bandijk ~ 100 m;
- Dwars-stroomsnelheden in de hoofdgeul < 0.3 m/s bij volle nevengeul en < 0,15 m/s bij meestromend winterbed.

De eerste twee regels omvatten al voldoende richtlijn om uiteindelijk achtereenvolgens de maximale sedimentatie in de hoofd- en nevengeul, gemiddelde stroomsnelheden, de nevengeulonttrekking en de daarbij behorende ontwerpparameters te bepalen. De derde regel is van belang voor de werking van hoogwaterkeringen, kribben en bandijk. De laatste vuistregel is van belang voor de scheepvaart, maar kon ook juist veroorzaakt

²⁵ De maximaal toegelaten hinder voor de scheepvaart bedraagt 5 dagen per jaar in een riviertraject van 15 km. Met modern materieel is het mogelijk om in die periode totaal 12.500 a 15.000 m³ sediment te baggeren op de Waal.

worden door de scheepvaart. Schepen kunnen hinder ondervinden van deze dwarsstromen, maar wekken ook zelf dwars-stroming op. De dwars-stroomsnelheden opgewekt door de nevengeul, nemen toe naarmate de nevengeul meer water onttrekt (§5.3.2).

Overbodige vuistregels

De volgende vuistregels zijn overbodig omdat deze al bepaald kunnen worden met de hierboven genoemde vuistregels.

- Stroomsnelheid nevengeul ~0,3 m/s
- Gemiddelde sedimentatiesnelheid hoofdgeul: 1 3 cm/jaar en totale sedimentatie < 0,2 m;
- Wateronttrekking nevengeul < 3 % van zomerbedafvoer moedergeul;
- Diepte nevengeul 0,5 4 m;
- Locatie nevengeul in winterbed (Aftakken in buitenbocht, benedenstrooms in het kribvak en zo recht mogelijke geul);
- Bifurcatiehoek zo groot mogelijk;
- Shieldsparameter nevengeul < 0,03;
- Meestroomfrequentie nevengeul 9 maanen/jaar;
- Breedte nevengeul Waal 80 -150 m, Maas en Rijn 50 100 m en IJssel 40 80 m.

9.1.2. Prioriteit erkennen binnen het ontwerpproces

Bij de aanleg van een nevengeul is het daarom erg belangrijk energie te steken in de juiste keuze van deze twee ontwerpparameters. Bij het ontwerpen van nevengeulen kan worden gezocht in verschillende ontwerpparameters om een doel te bereiken. Zo kan meer water worden onttrokken door te kiezen voor een bredere nevengeul, maar ook voor een lagere drempel. Een ander voorbeeld zijn de parameters die de loop van de nevengeul beïnvloeden. Zo kan een nevengeul om een obstakel worden geleidt door de bifurcatiehoek te veranderen, maar ook door de aftaklocatie in het kribvak te ontwerpparameters veranderen. De uit de voorbeelden ziin gekoppelde ontwerpparameters die beide eenzelfde doel kunnen dienen. Voor gekoppelde ontwerpparameters is het goed de parameter die een extremere invloed heeft als doorslaggevend te zien. Zo is het belangrijk in het laatste voorbeeld om de bifurcatiehoek als doorslaggevende parameter te nemen en de plek van aftakken in het kribvak iets aan te passen.

9.2. Aanbevelingen voor het modelleren van nevengeulen

Wanneer een tweedimensionaal Delft3D model wordt opgesteld om nevengeulen te modelleren wordt geadviseerd om te rekenen met een variabele afvoer. De belangrijke processen doorspoeling en erosie/sedimentatie in uiterwaarden worden hierdoor ook gemodelleerd. Mocht het echt niet mogelijk zijn met een variabele afvoer te rekenen en wordt er gekozen voor een constante afvoer, dan wordt aanbevolen het volgende in gedachten te houden. Bodemveranderingen in de *nevengeul* komen bij een stationair debiet het best overeenkomen met de bodemresultaten van de quasistationaire benadering vlak na het hoogwater. De bodemveranderingen van de *hoofdgeul* worden echter het best benaderd aan het eind van een laagwater periode.

Daarnaast wordt aanbevolen om de oevers van rivier en nevengeul zo veel mogelijk te laten volgen door de roosterlijnen. Voor een goede indicatie van morfodynamische processen is het daarbij aan te bevelen minimaal 8 roostercellen over de nevengeulbreedte te modelleren. Tevens is het van belang dat de oriëntatie van de roostercellen in de stroomrichting ligt. Dit betekent dat voor plekken waar het water van stroomrichting kan veranderen, wordt aanbevolen met vierkante roostercellen te rekenen. Dit dient om numerieke instabiliteit te voorkomen.

9.3. Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In dit hoofdstuk zijn aanbevelingen voor vervolgonderzoek besproken. Er zijn negen aanbevelingen voor vervolgonderzoek, onderverdeeld in de paragrafen: kalibratie en validatie, modelaanpassingen en vergelijkingsstudies.

9.3.1. Kalibratie en validatie

Een nadeel van dit onderzoek is dat het gebruikte model niet gekalibreerd of gevalideerd kon worden, omdat er geen data beschikbaar was voor dit onderzoek. Van de nevengeulen van Gameren (Nederland), is sinds kort data beschikbaar in de vorm van luchtfoto's van de afgelopen tien jaar (Schielen, mailconversatie, 2012). Deze luchtfoto's geven een goed beeld van de evolutie en zijn een goede methode om een model van de Gamerensche nevengeulen te kalibreren. Dit onderzoek zou dan gekoppeld kunnen worden aan de vraag die daar momenteel speelt: *wel of geen beheer?*

Bij het opstellen van het modelrooster leek het alsof de oriëntatie van de nagenoeg rechthoekige roostercellen een belangrijke rol speelde in de stabiliteit. Namelijk, wanneer de oriëntatie van de roostercel in de stroomrichting is, zijn er minder extreme schommelingen in bijvoorbeeld bodemligging en waterniveau te vinden; de lokale verschillen worden hierdoor iets uitgemiddeld. Omdat experts van mening verschillen over deze verklaring is vervolgonderzoek aanbevolen.

9.3.2. Modelaanpassingen

Onderverdeeld in drie subparagrafen zijn aanbevelingen gepresenteerd voor variaties op het opgestelde model uit dit onderzoek.

Afvoercurve met andere karakteristieken

Bij modelsimulaties moet een keuze worden gemaakt in de afvoer, de bovenstrooms opgelegde randvoorwaarde. Binnen dit onderzoek is gerekend met een quasistationaire benadering van een afvoercurve. Deze curve is gebaseerd op een gemiddelde overschrijdingscurve van twintig jaar aan data. Echter, van deze gemiddelde overschrijdingscurve hadden meerdere afvoercurven gecreëerd kunnen worden. Er is bijvoorbeeld gekozen om een afvoer te benaderen die één piek bevat. Daarom is aanbevolen te onderzoeken wat het effect is van een afvoercurve met andere karakteristieken. Voorbeelden zijn afvoercurven met meer dan één piek, een afvoerregime (langjarig gemiddelde afvoercurve) of verschillende afvoercurven achter elkaar. De focus in deze studie zal dan voornamelijk liggen op de verschillen tussen simulaties met andere afvoerkarakteristieken.

Hier sluit nog een derde advies voor vervolgonderzoek bij aan. Het zou interessant zijn om de modelresultaten van de gevonden representatieve afvoer te vergelijken met de modelresultaten waarbij een daadwerkelijke afvoercurve gebruikt is. In Delft3D is het momenteel enkel mogelijk om quasistationair te modelleren. In dit kader zou ik adviseren om te onderzoeken wat een optimale balans is tussen het aantal quasistationaire rekenstappen om de werkelijkheid beter te benaderen, en de rekentijd.

Domein uitbreiden

Binnen dit onderzoek is vrij veel tijd verloren gegaan aan het stabiliseren van het model. Om deze reden is het domein drastisch verkleind, zodat de rekentijd zo kort mogelijk werd. Geadviseerd wordt om het model uit te breiden, zodat ook de hydro- en morfodynamische processen verder boven- en benedenstrooms van de nevengeulingreep bepaald kunnen worden.

Breedte/diepte-verhouding

De parameter *breedte/diepte-verhouding* van de nevengeul (doorstroomoppervlak gelijk houden) is cruciaal voor sedimenttransport. Daarom wordt aanbevolen om het doorstroomopperlvak (Breedte * diepte) constant te houden, waarbij de breedte en diepte wel variëren. Dat geeft een beter inzicht in effecten van een brede/ondiepe of een smalle/diepe nevengeul op de hydro- en morfodynamica.

Effect kribben

Dit is het eerste onderzoek naar hydro- en morfodynamische processen in nevengeulsystemen, waarbij kribben in de moedergeul meegenomen zijn. Interessant is te kijken naar de daadwerkelijke invloed van kribben. Daarom wordt geadviseerd een modelsimulatie te doen waarbij de kribben uit het model verwijderd zijn.

Bulle-effect

Het Bulle-effect lijkt een verwaarloosbaar effect op de sedimentverdeling tussen hoofden nevengeul te hebben. Om dit effect daadwerkelijk uit te kunnen sluiten moeten extra modelsimulaties gedraaid worden waarbij de component voor spiraalstroming niet wordt meegenomen, en driedimensionale simulaties. Hierbij kan tevens onderzocht worden of er op de plek van aftakken werkelijk nagenoeg geen sprake is van spiraalstroming.

9.3.3. Aanbevelingen voor vergelijkingsstudies

Het opgestelde model in deze studie kan goed worden vergeleken met andere studies, methoden of regels. De aanbevelingen hiervoor zijn in deze paragraaf gepresenteerd.

Vergelijking met eerder onderzoek

Van Putten (2011) heeft in zijn onderzoek gekeken naar het morfodynamisch gedrag in een nevengeul met een bifurcatiehoek van 16.7°. Doordat deze bifurcatiehoek bijna gelijk is aan de bifurcatiehoek van 20° in dit onderzoek, kunnen deze twee varianten goed met elkaar worden vergeleken. Op deze manier kan meer inzicht worden gekregen in het effect van de gekozen ontwerpparameters door Van Putten ten opzichte van de parameters binnen dit onderzoek.

Daarnaast zal het daadwerkelijke effect van de bifurcatiehoek pas bepaald kunnen worden als bekend is wat het effect van de lengteverhouding van neven- en hoofdgeul is. Dit komt doordat een variatie in bifurcatiehoek mede invloed heeft op de lengteverhouding die de neven- en hoofdgeul met elkaar hebben. Mosselman (2002) classificeerde de lengteverhouding mede als een parameter die invloed heeft op de sedimentatie en erosie. Om de genoemde effecten daadwerkelijk toe te kunnen schrijven aan de keuze in bifurcatiehoek is het van belang dat er ook modelsimulaties uitgevoerd worden met verschillende lengteverhoudingen.

Daarbij komt dat het interessant is een gevoeligheidsanalyse uit te voeren naar de invloed van de bifurcatiehoek op de nevengeulonttrekking. De modelresultaten binnen dit onderzoek laten duidelijk zien dat een kleinere bifurcatiehoek leidt tot een grotere nevengeulonttrekking. Echter, dit verband lijkt extremer voor de zeer kleine (20°) of juist grote (90°) bifurcatiehoeken, en minder extreem voor bifurcatiehoeken rond 45°.

Uit zowel de literatuur (Mosselman, Jagers, & Schijndel, Optimalisatie inlaat nevengeulen, 2004) als dit onderzoek blijkt dat een aftakking benedenstrooms in een

kribvak effect heeft op de uitschuring van de benedenstrooms gelegen krib. Echter, het effect van de bifurcatiehoek op deze uitschuring is nog niet bekend. Vervolgonderzoek met een driedimensionaal model zal nodig zijn. Hierin zal de bifurcatiehoek moeten variëren bij een benedenstroomse aftakking in het kribvak.

Uit het onderzoek van Van Putten (2011) blijkt dat een nevengeul kan leiden tot het ontstaan van alternerende banken in de moedergeul, benedenstrooms van de nevengeulmonding. Vervolgonderzoek moet uitwijzen wat de grootte is van de alternerende banken per variant, om daarmee het totale baggerbezwaar per variant te bepalen.

Vergelijking met huidige nevengeulmodellering

Momenteel wordt bij Deltares het effect van een nevengeul op de morfodynamiek in de hoofdgeul bepaald door het modelleren van debietonttrekking en -toevoeging op respectievelijk het punt van aftakken en de monding van de nevengeul. Interessant zou zijn om de modelsimulaties uit dit onderzoek te vergelijken met deze veelgebruikte modelleerwijze. Hierdoor kan inzicht worden verkregen in het misgelopen inzicht in hydro- en morfodynamische processen bij de huidige, versimpelde manier van modelleren.

Vergelijking met ecologische doelstellingen

Nevengeulen worden (bijvoorbeeld in het kader van Kader Richtlijn Water) ook aangelegd ter creatie van natuur. Het verschil in doelstelling met een nevengeul voor de Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier (PKB RvR) leidt tot andere nevengeuldimensies en andere beheer- en onderhoudsdoelen. Interessante vergelijkingen zijn: vergelijking van een RvR-nevengeul met de KRW-doelen en vergelijking van een KRW-nevengeul met de RvR-doelen.

Literatuur

- Ahrens, J. (2000). A fall-velocity equation. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Maart/April 2000*, 126: 99-102.
- Alterra Wageningen UR. (2007). *Projecten in 2006.* Opgeroepen op april 12, 2012, van Ruimte voor de Rivier WUR: http://www.ruimtevoorderivier.wur.nl
- Bulle, H. (1926). Untersuchungen über die geschiebeableitung bei der spaltung von wasserläufen. Berlin SW 19: VDI-Verlag G.m.b.H.
- Bulle, H. (1926). Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen. Berlin SW 19: VDI-Verlag Duitsland.
- Coleman, S., & Smart, G. (2011). Fluvial sediment-transport processes and morphology. *Journal of Hydrology 50 (1)*, pp. 37-58.
- Darve, C. (2003, januari 28). *Memoire sur les lois du mouvement des fluides*. Opgeroepen op maart 13, 2012, van C. Darve Web site: http://cdarve.web.cern.ch/cdarve/Publications_CD/Navier_Darve.pdf
- De Nooijer, J. (2006). *Invloed van een nevengeul op morfologie en sedimentverdeling bij een riviersplitsing.* Delft: Technische Universiteit Delft.
- Deltares. (2010). *Delft3D Suite*. Opgeroepen op Februari 9, 2012, van Deltares Web Site: http://www.deltaressystems.com
- Deltares. (2010). *Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic and transport phenomena, including sediments. User Manual Version: 3.14.* Delft: Deltares.
- DHV B.V. (2010). Voorspellen afvoer nevengeulen. Amersfoort: DHV B.V.
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams.* Kopenhagen: Teknisk Forlag.
- Expertise- en InnovatieCentrum Binnenvaart. (2011, juni 26). Schip afladen op waterstand. Hoe werkt dat? Opgeroepen op april 11, 2012, van Informatie binnenvaart (Veiligheid): http://www.informatie.binnenvaart.nl
- Gerritsen, H., & Schropp, M. (2010). *Handrijking sedimentbeheer nevengeulen.* Arnhem: Rijkwaterstaat Waterdienst.
- Google. (2012). *Google Maps*. (Google) Opgeroepen op Oktober 2012, van Locatie Afferdense- en Deestse waarden: http://maps.google.nl
- Hallermeier, R. (1981). Terminal settling velocity of commonly occurring sand grains. *Sedimentology*, 28: 859-865.
- Helmer, W. e. (1992). *Levende Rivieren: Studie in opdracht van het Wereld Natuur Fonds.* Utrecht: Hoonte Bosch & Keuningen.
- Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn. (2011). *Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn.* Koblenz: Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn.

- Jansen, P., Van Bendegom, L., Van den Berg, J., De Vries, M., & Zanen, A. (1979). *Principles of river engineering, The non-tidal alluvial river.* London: Pitman Publishing Limited.
- Jörissen, J. (2001). Strandhoofden gemodelleerd in Delft3D-RAM. Delft: Delft University.
- Kleinhans, M., Jagers, H., Mosselman, E., & Sloff, C. (2008, Augustus 30). Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models. *Water resources research. Vol.* 44, pp. 1-31. Doi: 10.1029/2007WR005912.
- Klop, E. (2009). *Morfologische ontwikkelingen in sedimenterende nevengeulen: ontwerpparameters* & *sedimentbeheersende maatregelen.* Enschede: Universiteit Twente.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms & processes a new perspective.* London: Arnold, an imprint of Hodder education.
- Kroekenstoel, D. (2009). *Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren.* Arnhem: Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Kumar, B. (2011, February 8). Flow Resistance in Alluvial Channel. *Water Resources*, pp. 745–754.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *Tweede bijeenkomst Indernationaal verbond voor waterbouwonderzoek* (pp. 39-64; Bijlage 2). Stockholm: Indernationaal verbond voor waterbouwonderzoek.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2011). *Werkprogramma stroomgebiedbeheerplannen 2015.* Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Leidraad Rivieren.* Den Haag: Drukkerij Ando bv.
- Mosselman, E. (2002). *Morphological development of side channels*. Delft: WL | Delft Hydraulics.
- Mosselman, E., Jagers, B., & Schijndel, S. (2004). *Optimalisatie inlaat nevengeulen*. Delft: WL | Delft Hydraulics.
- Peters, B. (2009a). Kwaliteitsprinciepes uiterwaardinrichting. Princiepes voor de landschapsecologische kwaliteit van inrichtingsprojecten in het rivierengebied. Uitgave van Ministerie van LNV, Staatsbosbeheer, Rijkswaterstaat en Dienst Landelijk Gebied. Nijmegen: Drukkerij Efficiënt.
- Peters, B., Kater, E., & Geerling, G. (2006). *Cyclisch beheer in uiterwaarden.* Nijmegen: Radboud Universiteit.
- Petts, G., & Ameros, c. (1996). Fluvial Hydosystems. Londen: Chapman & Hall.
- Phillips, N. (1957). A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of meteorology. Vol. 14*, pp. 184-185.

- Ribberink, J. (2010). *River dynamics II: Transport processes and morphology.* Enschede: University of Twente.
- Ribberink, J. (2012, februari 21). Startbijeenkomst. (P. Schuurman, Interviewer)
- Richardson, J., & Zaki, W. (1954). Sedimentation and fluidisation. Part I. Institution of chemical engineering (Great-Brittain). Vol. 32, pp. 35-53.
- Rijkswaterstaat. (2010). *Handreiking sedimentbeheer nevengeulen.* Arnhem: Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Rijkswaterstaat. (2012, April). *Watergegevens Waterbase*. Opgehaald van Rijkswatestaat: http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata_waterberichtgeving/watergegeven s/index.aspx
- Royal Haskoning. (2011, Februari 1). *Royal Haskoning nieuwe partner voor DLG*. Opgeroepen op Februari 7, 2012, van Royal Haskoning Web site: htt[://www.royalhaskoning.com
- Ruimte voor de Rivier. (2011). *Organisatie de facts*. Opgeroepen op december 31, 2011, van Ruimte voor de Rivier: www.ruimtevoorderivier.nl
- Ruimte voor de Rivier. (2012, april 10). *Waar doen we dit Projecten*. Opgeroepen op april 12, 2012, van Ruimte voor de Rivier: http://www.ruimtevoorderivier.nl
- Schielen, R. (2012, maart 12). E-mail conversatie over locatiekeuze. (P. Schuurman, Interviewer)
- Schielen, R. (2012, juni 19). mailconversatie. Verslag excursie Gameren 14 juni 2012 vanuit Dienst Oost Nederland.
- Schoor, M., Greijdanus, M., Geerling, G., Van Kouwen, L., & Postma, R. (2011). *Een nevengeul vol leven, handrijking voor een goed ecologisch ontwerp.* Arnhem: Rijkswaterstaat.
- Simons, D., & Richardson, E. (1966). Resistance to flow in alluvial channels. *United States geological survey water-supply paper*, p. 422.
- Sloff, C. (2012, maart 13). Persoonlijke communicatie locatie keuze. (P. Schuurman, Interviewer)
- Sloff, C., & Yossef, M. (2012, Mei). Persoonlijke communicatie mofrodynamiek in uiterwaarden. Schuurman, P.K. Delft.
- Southard, J. (1991). Experimental determination of bed-form stability. *Annual revieuw of earth and planetary sciences, Vol.* 19, pp. 423-455.
- Struiksma, N. O. (2010). Bed deformation in curved alluvial channels. 23:1, 57-79.
- Van der Mark, C. (2004). *Sedimentverdeling bij riviersplitsingen.* Delft: Technische Universiteit Delft.
- Van Putten, D. (2011). *Morfologisch modelleren van nevengeulen in 2D.* Enschede: Universiteit Twente.

- Van Rijn, L. (1984a, Oktober 10). Sediment transport, part I: Bed-load transport. *Journal* of Hydraulic Engineering. Vol 110, pp. 1431-1456.
- Van Rijn, L. (1984b, November 11). Sediment transport, part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 110*, pp. 1613-1641.
- Van Rijn, L. (1990a). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans.* Amsterdam: Aqua Publications.
- Van Rijn, L. (1990b). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.* Amsterdam: Aqua Publications.
- Verbruggen, W. (2012). *Numerical nonlinear analysis of alternate-bar formation under super-resonant conditions.* Delft: Delft University of Technology.
- Verbruggen, W. (2012, april 12). Ontstaan van alternerende banken. (P. Schuurman, Interviewer)
- Wang, Z., Fokkink, R., De Vries, M., & Langerak, A. (1995, Augustus 28). Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models. *Journal of hydraulic engineering*. *Vol. 33* [6], pp. 739-750.
- WL | Delft Hydraulics. (2003). *Kader hydraulische analyse bovenricvierengebied PKBstudie deelrapport A.* Delft: WL | Delft Hydraulics.
- Wolters, H., Platteeuw, M., & Schoor, M. (2001). *Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden.* Almere: Evers Litho en Druk.
- Yossef, M., Giri, S., & Mark, C. v. (2010). *Voorspelinstrument duurzame vaardiepte Rijndelta: DVR-model update 2010.* Delft: Deltares.
- Yossef, M., Stolker, C., Giri, S., Hauschild, A., & Van Vuren, S. (2008). *Voorspelinstrument duurzame vaarweg: Calibration of the multi-domain model.* Delft: WL| Delft Hydraulics.

Bijlagen

Bijlage /	A: Experimenten Bulle	
Bijlage	B: Procesomschrijvende formules	
B1.	Rekenrooster	
B2.	Waterbeweging	
B3.	Spiraalstroming	
Bijlage	C: Numeriek model	
C1.	Courantgetal	
C2.	Transportrandvoorwaarde	
C3.	Valsnelheid sediment	
Bijlage D: Modelresultaten variatie in initiële condities		
D1.	Algemeen effect (model)implementatie nevengeul	
D2.	Bifurcatiehoek	
D3.	Plek van aftakken in het kribvak	
D4.	Breedte/diepte-verhouding	
D5.	Instroomdrempelconstructie	
D6.	Baggerindicatie	
Bijlage	E: Modelresultaten stationaire benadering	

Bijlage A: Experimenten Bulle

Deze bijlage bevat een overzicht van de experimenten die Bulle (1926) heeft uitgevoerd. De formulering van het Bulle-effect (als benoemd in §2.2) is gebaseerd op deze experimenten.

Het effect van de bifurcatiehoek bij een riviersplitsing is door Bulle (1926) experimenteel onderzocht. De proeven van Bulle kunnen opgedeeld worden in twee subgroepen. Ten eerste heeft Bulle puur gekeken naar de effecten van een splitsing op de waterverdeling (hydraulische gedeelte). Ten tweede heeft Bulle gekeken naar het effect van een splitsing op sedimentverdeling. In de proefopstelling heeft Bulle ervoor gezorgd dat de hoofdstroom en de aftakking gelijke dimensies (gelijke profielen, lengtes en verhang) hadden. In zijn proefopstelling varieerde de hoek die de nevengeul met de hoofdstroom maakt (bifurcatiehoek) van 30° tot 150°, waaruit hij kon concluderen dat meer water afgevoerd wordt via de hoofdstroom wanneer de bifurcatiehoek groter wordt.(Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926). De moedergeul en de nevengeul vormen samen een bocht (Figuur 2-3), zodat hier spiraalstroming optreedt (§B3). Dit resulteert in een stroming vlak bij de bodem die de nevengeul instroomt en de waterdeeltjes bij het wateroppervlak die verder in de hoofdgeul stromen. Doordat het grovere sedimenttransport als bodemtransport wordt getransporteerd, zal het grovere sediment meegevoerd worden in de aftakking, terwijl het zwevend sediment in de hogere waterlaag door zal stromen in de hoofdgeul zelf (Figuur 2-3 en Figuur 2-4). Dit wordt het Bulle-effect genoemd. Het Bulle-effect domineert alleen als de breedte/diepte-verhouding klein is (Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926)(Van der Mark, 2004).

De experimenten die Bulle (1926) heeft uitgevoerd hebben allen een vaste bodem. Bij verschillende proeven is bovenstrooms zand toegevoegd. Doordat de kwalitatieve resultaten zijn beïnvloed door een niet-erodeerbare bodem, zijn de resultaten kwalitatief van aard. Ze geven een goed beeld van de sediment- en waterbeweging. De uitgevoerde experimenten door Bulle (1926) (rechtstreekse kopie uit Van der Mark, 2004):

A. Experimenten met vaste bodem.

- Bestudering van de waterbeweging bij een hoek van afsplitsing van $\theta_b = 30^\circ$.
- Idem voor een hoek van afsplitsing van $\theta_b = 60^{\circ}$.
- Idem voor een hoek van afsplitsing van $\theta_{\rm b} = 90^{\circ}$.
- Idem voor een hoek van afsplitsing van $\theta_b = 120^\circ$.
- Idem voor een hoek van afsplitsing van $\theta_{b} = 150^{\circ}$.
- Idem met afgeronde oeverknik voor een hoek van afsplitsing van $\theta_b = 30^\circ$.
- Idem met afgeronde oeverknik voor een hoek van afsplitsing van $\theta_b = 60^\circ$.
- Idem met afgeronde oeverknik voor een hoek van afsplitsing van $\theta_{b} = 90^{\circ}$.
- B. Experimenten met vaste bodem en toevoeging van zand bij $\theta_b = 30^\circ$.
 - Bestudering van stroombeeld en zandbeweging voor een periode van 45 min.
 - Idem voor een periode van 75 min.
- C. Experimenten met een zandbodem bij θ_b = 30°.
 - Bestudering van stroombeeld en zandbeweging voor een periode van 15 min.
 - Idem voor een periode van 60 min.
- D. Experimenten met vaste bodem en toevoeging van zand bij veranderlijke θ_b .
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 60^\circ$ voor een periode van 45 min
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 60^\circ$ voor een periode van 75 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 90^\circ$ voor een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 90^\circ$ voor een periode van 75 min.

- Hoek van afsplitsing $\theta_b = 120^\circ$ voor een periode van 45 min.
- Hoek van afsplitsing $\theta_b = 150^\circ$ voor een periode van 45 min.
- E. Experimenten met vaste bodem en toevoeging van zand bij afgeronde oeverknik.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 30^\circ$ voor een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 60^\circ$ voor een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 90^\circ$ voor een periode van 45 min.
- F. Experimenten met vaste bodem en toevoeging van zand met andere debietverdeling.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 30^\circ$ en $Q_1/Q_2 = 1$ en een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 30^\circ$ en $Q_1/Q_2 = 1,63$ en een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 30^\circ$ en $Q_1/Q_2 = 2,45$ en een periode van 45 min.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 30^\circ$ en $Q_1/Q_2 = 4,17$ en een periode van 30 min.
- G. Experimenten met vaste bodem en toevoeging van zand met andere breedteverhouding.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 90^\circ$ en $B_1/B_2 = 2$ en $Q_1/Q_2 = 2,23$.
 - Hoek van afsplitsing $\theta_b = 90^\circ$ en $B_1/B_2 = 2$ en $Q_1/Q_2 = 1$.

Kwalitatieve resultaten waterbeweging (Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926):

- Bij het splitsingspunt is een verhang in dwarsrichting van de waterspiegel, welke het laagst is in de binnenbocht. Deze neemt toe bij een grotere bifurcatiehoek en af bij een grotere verdeling van Q_{hoofdgeul}/Q_{nevengeul}.
- De waterspiegel van aan het begin van de hoofdgeul stijgt over een korte afstand sterkt.
- Het verhang in langsrichting van de bodem is niet gelijk aan die van het water.
- Bovenstrooms van de splitsing ontstaat een denkbeeldige scheiding. Het water aan de ene kant van deze scheiding zal de nevengeul instromen, het water aan de andere kant de hoofdgeul. Dit denkbeeldige vlak ligt dusdanig dat het bij het wateroppervlak parallel aan de rivieroever loopt en bij de bodem bijna haaks op de hoofdgeul staat. Dit betekend dat al het water bij de bodem de aftakking in zal stromen, wat Bulle (1926) toeschrijft aan de spiraalstroming.
- Er kunnen drie neren ontstaan, namelijk bij:
 - De bovenstroomse oever van de nevengeul. Begint bij de oeverknik, bij bodem kleiner dan bij wateroppervlak;
 - De splitsingkop (afwisselend in hoofd- en zijtak);
 - De oever van de hoofdstroom tegenover de splitsingskop.
- Er wordt minder water door de afsplitsing onttrokken nabij de bodem bij een toename van θ_b van 30° naar 90° en een afname van θ_b van 150° naar 90° (Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926).

Kwalitatieve resultaten sedimentverdeling (Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926):

- Er wordt minder sediment door de afsplitsing onttrokken nabij de bodem bij een toename van θ_b van 30° naar 120° en een afname van θ_b van 150° naar 120° (Bulle, Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen, 1926).
- Bij een oeverknik die afgerond is wordt minder sediment onttrokken door de aftakking.
- Er wordt minder sediment onttrokken door de nevengeul bij een toename van $Q_{\text{hoofdgeul}/\textsc{Qnevengeul}}.$

Bijlage B: Procesomschrijvende formules

Zoals in paragraaf 0 is omschreven is het numerieke software pakket Delft3D gebruikt voor de modelsimulaties voor deze studie. Deze bijlage gaat iets dieper in op het rekenrooster, de waterbeweging en de geparametriseerde spiraalstroming.

B1. Rekenrooster

Het rekenrooster in Delft3D is kromlijnig en versprongen ('staggered'). Hierbij houdt een kromlijnig rooster in dat bochten gemodelleerd worden door opeenvolgende cellen onder een kleine hoek ten opzichte van elkaar te modelleren. Bij het opstellen van een kromlijnig rooster moeten een aantal criteria aangehouden worden (Deltares, 2010). Ten eerste moet het rooster zo goed mogelijk aansluiten op de grenzen tussen land en water. Daarnaast zal het rooster zo min mogelijk moeten afwijkingen van een ortogonale²⁶ positie. Als laatst zal de ruimte tussen de roosterlijnen geleidelijk moeten variëren over het rekengebied, om de kans op onnauwkeurigheden in de eindigdifferentiecomponenten te minimaliseren. Een versprongen rooster houdt in dat de snelheden en impulsen aan de randen van de rekencellen worden bepaald en dat de overige variabelen (als waterhoogte en bodemligging) in het midden of op de hoekpunten van een rekencel bepaald worden. De basis instelling in Delft3D is dat de waterstanden in het midden, en de bodemligging op de hoekpunten van de rekencel worden bepaald (Deltares, 2010; Figuur Bijlage-1). Belangrijk is om dit bij het analyseren van de resultaten goed in de gaten te houden. Op plekken waar er sterke gradiënten optreden in de waterstanden en bodemligging, kunnen onnauwkeurigheden in de resultaten ontstaan, doordat beide een functie van de tijd zijn en daardoor niet goed aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Een verbeterpunt hiervoor is het verfijnen van het rooster (en de bijbehorende rekenstap), met als beperking de rekentijd. Het Courantgetal is hier een maatstaaf voor (zie Bijlage C).



Figuur Bijlage-1. Versprongen rooster als in Delft3D-FLOW. Het water stroomt van rechts naar links.

B2. Waterbeweging

De waterbeweging wordt beschreven met de ondiepwatervergelijkingen (verg.1-2), welke bij tweedimensionale simulaties dieptegemiddeld (2DH) worden genomen. De

²⁶ Orthogonaal houdt in dat de roosterlijnen loodrecht op elkaar moeten staan. Hier moet zo min mogelijk van afgeweken worden.

ondiepwatervergelijkingen bestaan uit de (Reynolds-gemiddelde²⁷) Navier-Stokes vergelijkingen en de continuïteitsvergelijking. De (Reynolds-gemiddelde) Navier-Stokes vergelijkingen (verg.1-2) zijn gebaseerd op een momentbalans van een klein waterelementje (tweede wet van Newton²⁸). Aangenomen is dat de massa van het waterelementje onsamendrukbaar is; dus de massa water dat het elementje instroomt, zal gelijk moeten zijn aan de massa water dat het elementje uitstroomt (m = constant). De verticale component van de Navier-Stokes vergelijkingen is gereduceerd naar de hydrostatische druk relatie (verg.3). Hierbij is aangenomen dat de verticale versnellingen niet hoeven te worden meegenomen omdat deze klein zijn in vergelijking met de zwaartekrachtversnelling. Bij de continuïteitsvergelijking (verg.4) wordt er vanuit gegaan dat een verandering in de in- en uitstroom van een waterelementje resulteert in een verandering van de waterstand (ζ). Waarbij *S* de bronterm is; bijvoorbeeld toevoeging of onttrekking van water, neerslag of verdamping. Deze zal in het nevengeulsysteem gelijk zijn aan nul.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_x$$
 (verg.1)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_y$$
 (verg.2)

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g H \tag{verg.3}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d+\zeta) \cdot u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+\zeta) \cdot v]}{\partial y} = S$$
 (verg.4)

De horizontale componenten van de Navier-Stokes vergelijkingen zijn als volgt opgebouwd (gekozen is om enkel de termen in x-richting te presenteren, de dimensie van elke term is m/s^2):

$$\begin{array}{ll} \frac{\partial u}{\partial t} & \text{Vertragingterm (innertia)} \\ u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} & \text{Advectietermen} \\ -fv & \text{Coriolisterm} \\ -\frac{1}{\rho_0}P_x & \text{Drukgradiënt;} -\frac{1}{\rho_0}P_x = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} - g\frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ F_x & \text{Wrijvingsterm. Wanneer aangenomen wordt dat de horizontale} \\ & \text{lengteschaal vele malen groter is dan de waterdiepte, geldt:} F_x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \\ & \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \\ Waarbij voor kleinschalige stromingen (schuifspanning bij de oevers \\ & \text{worden meegenomen}), de schuifspanning als volgt uitgedrukt wordt: \\ & \tau_{xx} = 2v_H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\right), \tau_{xy} = v_H \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial x}\right) \right\}, \tau_{yy} = 2v_H \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial y}\right) \\ \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z}\right) & \text{Dispersieterm (viscositeit; stroperigheid)} \\ & \text{Impulsterm door onttrekking of lozing van het water. Lozing of onttrekking leidt tot een impuls. Wanneer de lozing met een hogere \\ \end{array}$$

²⁷ Het is mogelijk in Delft3D om de fluctuaties door wervelingen (eddies) te simuleren (met gebruik van Horizontal Large Eddy Simulation, HLES); wanneer deze functie niet gebruikt wordt (bijvoorbeeld door een te grof rooster), zullen de basisvergelijkingen voor de waterbeweging Reynolds-gemiddeld genomen worden.
²⁸ De (Reynolds-gemiddelde) Navier-Stokes vergelijkingen zijn gebaseerd op de verbeterde versie die Stokes

²⁸ De (Reynolds-gemiddelde) Navier-Stokes vergelijkingen zijn gebaseerd op de verbeterde versie die Stokes (in 1945 en 1951) maakte van de vergelijkingen van Navier (uit 1821), welke gebaseerd zijn op de Eulervergelijkingen (uit 1755). Euler werkte met de vergelijkingen van Bernoulli (uit 1738) als basis, die op zijn beurt gebaseerd waren op de tweede wet van Newton (in 1687).

snelheid (\hat{U}) aan het stromende water (met stroomsnelheid u) toegevoegd wordt, zal deze ter plekke dus een versnelling ondervinden: $M_x = q_{in}(\hat{U} - u)$

In dit onderzoek is tweedimensionaal gerekend. Dit betekent dat de verticale termen $(w \frac{\partial u}{\partial z} \text{ en } \frac{\partial}{\partial z} (v_v \frac{\partial u}{\partial z}))$ wegvallen in de Navier-Stokes vergelijkingen. Tevens zal de coriolisterm (fv) niet meegenomen worden en is er geen sprake van toevoeging of onttrekking (waardoor de impulsterm (M_x) wegvalt). De bronterm *S* in de continuiteitsvergelijking zal in het nevengeulsysteem gelijk zijn aan nul.

B3. Spiraalstroming

Een belangrijk hydraulisch en morfodynamisch proces dat plaatsvindt in bochten, is de spiraalstroming die in een bocht ontstaat. Bochten in rivieren hebben hierdoor effect op de morfologie van de rivier zelf. Allereerst ondervindt het water een middelpuntvliedende kracht als het door de bocht stroomt. Dit heeft als resultaat dat er een verhang in de waterlijn dwars op de stroomrichting ontstaat, waarbij de waterstand in de binnenbocht hoger is dan die in de buitenbocht (Figuur Bijlage -2a). Het verhang in de waterlijn zorgt voor een hydrostatisch drukverschil, welke resulteert in een uniform verdeelde kracht over de verticaal in tegenovergestelde richting werkt als de middelpuntvliedende kracht (Figuur Bijlage -2b en c). Daarnaast varieert de middelpuntsvliedende kracht met de stroomsnelheid. Het effect van de stroomsnelheid is dominant in de verticaal, waar de stroomsnelheid op nul wordt verondersteld bij de bodem en maximaal bij het wateroppervlak met een logaritmisch verloop. De middelpuntsvliedende kracht is daarom groter bij het wateroppervlak dan bij de bodem.



Figuur Bijlage -2. Spiraalstroming, veroorzaakt door centrifugaalkracht (a) en hydrostatisch drukverschil (b en c).

De combinatie van de variabele middelpuntsvliedende kracht en de hydrostatische drukgradiënt (door het verhang in de dwarsrichting) resulteert in een circulatiestroming in de dwarsrichting (Figuur Bijlage -2). Bij deze secundaire stroming, stroomt het water bij de bodem richting de binnenbocht en bij het wateroppervlak richting de buitenbocht. Samen met de primaire stroming in de langsrichting resulteert dit in de zogeheten spiraalstroming. In het geval van hogere concentraties van sediment bij de bodem, wordt er netto meer sediment richting de binnenbocht getransporteerd. Dit sediment heeft een grotere korrelgrootte dan het sediment (in suspensie) dat naar de buitenbocht getransporteerd wordt. Dit leidt tot een netto sedimentatie in de binnenbocht en erosie in de buitenbocht, waardoor een verhang in de bodem ontstaat. Door dit verhang heeft het

sediment de neiging om naar beneden te rollen door de werking van de zwaartekracht. Uiteindelijk stelt zich een evenwicht in.

Bij de 2DH-berekeningen zal de spiraalstroming indirect bepaald moeten worden. Deze spiraalstroming varieert sterk over de verticaal, maar is klein ten opzichte van de karakteristieke horizontale stroomsnelheid. De intensiteit (*I*) van de spiraalstroming wordt gebruikt om de plaatselijke hoek van afbuigen te bepalen(Deltares, 2010). Hoe verder de bocht doorlopen is, hoe groter deze intensiteit zal zijn. De intensiteit van deze spiraalstroming is opgebouwd over de gehele waterkolom:

$$I = \int_{z=0}^{z=d+\zeta} |v(z)| dz$$

$$v(z) = f(z) \cdot I$$
(verg.6)

Waarbij v(z) de snelheidscomponent is van de spiraalstroming loodrecht op de dieptegemiddelde stroomsnelheid en de verticale verdeing van de spiraalstroming afhangt van de verticale coordinaat f(z).

Deze spiraalstroming leidt tot een afwijking van de dieptegemiddelde stroomrichting, en dus de richting van het bodemtransport. Dit effect wordt meegenomen in de component van de bodemschuifspanning die loodrecht op de dieptegemiddelde stroomrichting staat:

$$\tau_{br} = -2\rho\alpha^{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) |\vec{U}| I \qquad (verg.7)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} < \frac{1}{2} \qquad (verg.8)$$

Met κ is de Von Karmenconstante.

Om de spiraalstroming mee te kunnen nemen, moeten de dieptegemiddelde ondiepwatervergelijkingen (verg. 1-2) ook aangepast worden(Deltares, 2010). Er zal een extra advectie-dispersie-vergelijking toegevoegd moeten worden (verg.8) die de aanpassing aan de spiraalstroming meeneemt. Daarnaast zullen extra termen meegenomen worden in de momentvergelijkingen die de horizontale effectieve schuifspanning meenemen die voortkomt uit de spiraalstroming.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_x - \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(d+\zeta)} + F_{sx}$$
(verg.9)

Met F_{sx} die het effect van de spiraalstroming omschrijft.

De hoofdstroom wordt logaritmisch verondersteld en de spiraalstroming is een vermenigvuldiging tussen een universele functie en de intensiteit van de spiraalbeweging.

$$F_{sx} = \frac{1}{d+\zeta} \left\{ \frac{\partial [(d+\zeta)T_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+\zeta)T_{xy}]}{\partial y} \right\}$$
(verg.10)

Hierbij is *T* de schuifspanning die resulteert uit de spiraalstroming. Met: $T_{xx} = -2\beta UV$, $T_{xy} = T_{yx} = \beta(U^2 - V^2)$, $T_{yy} = 2\beta UV$. Waarbij: $\beta = \beta^* \frac{(d+\zeta)}{R_s^*}$, met $\beta^* = \beta_c(5\alpha - 15.6\alpha^2 + 37.3\alpha^3)$. Hierbij varieert β_c tussen 0 en 1, gebruiker-gespecificeert, waarbij $\beta_c = 0$ inhoudt dat er geen invloed is van spiraalstroming. R_s^* is de effectieve straal van de kromming van een tweedimensionale stroomlijn.

Bijlage C: Numeriek model

C1. Courantgetal

Om te testen of een model numeriek stabiel is, kan het Courantgetal bepaald worden. Hoe hoger het Courantgetal, hoe groter de kans op numerieke instabiliteit. Bij modelsimulaties in het DVR-model kan het Courantgetal maximaal 8 zijn. Het Courantgetal geeft de verhouding weer tussen de fysische en de numerieke snelheid. Parameters die hier een rol in spelen zijn: de minimale afmetingen van de roostercellen, de tijdstap en de parameter van interesse (bijvoorbeeld waterstand of de verplaatsing van een erosie-/sedimentatiegolf). Het tweedimensionale Courantgetal voor de waterbeweging is gegeven in verg. 11. Waarin *g* de gravitatieversnelling $[m/s^2]$ en *H* de totale waterdiepte [m] zijn, Δx en Δy de roostercelafmetingen [m] en Δt de gekozen rekentijdstap [s]. Voor de morfodynamica is het courantgetal gegeven in verg. 12. Hierin is c_b de bodemverstoringssnelheid [m/s].

$$C_{f} = 2\Delta t \sqrt{g H \left(\frac{1}{\Delta x^{2}} + \frac{1}{\Delta y^{2}}\right)}$$
(verg.11)
$$C_{f} = \frac{c_{b}\Delta t}{\Delta x}$$
(verg.12)

C2. Transportrandvoorwaarde

Illustratieve ondersteuning van gemaakte keuze in §4.3.5 om bij de instroomrand geen stijging of daling van de bodem te definiëren, maar deze vast te leggen (dus een constante stijging van 0). In Figuur Bijlage-3 zijn de metingen opgenomen; single-beam over de periode 1990 – 2006 (Yossef, Stolker, Giri, Hauschild, & Van Vuren, 2008). Gekozen is Hiervoor is gekozen omdat de gemiddelde bodemmetingen tussen rivierkilometer 898 en 905 (gekozen locatie; §4.3.2) nul zijn (Figuur Bijlage-3).



Figuur Bijlage-3. Breedtegemiddelde bodemveranderingen in de Waal (rivierkilometer 896 - 915) (Yossef, Stolker, Giri, Hauschild, & Van Vuren, 2008).

C3. Valsnelheid sediment

Vergelijking 16 (Hallermeier, 1981) is de basis voor de berekening van de valsnelheid.

$$Re = C_{l}A + C_{t}\sqrt{A}$$
(verg.13)

$$Re = \frac{w_{s}d}{v}$$
(verg.14)

$$A = \frac{\Delta g d^{3}}{v^{2}}$$
(verg.15)

Waarbij A = Archimedes' drijfvermogengetal (verg.15), Re = Reynoldsgetal (verg.14), d = karakteristieke diameter van de korrel [m], v = kinematische viscositeit van water [m²/s], w_s = valsnelheid [m/s], C_l en C_t coëfficiënten voor respectievelijk laminaire en turbulente stromingsregime. Ahrens (2000) heeft de bijbehorende relaties coor de laatste twee gevonden (verg. 17 en 18).

$w_s = C_l \frac{\Delta g d^2}{\nu} + C_t \sqrt{\Delta g d}$	(verg.16)
$C_l = 0.055 \operatorname{tanh}[12A^{-0.59} \exp(-0.0004A)]$	(verg.17)
$C_t = 1.06 \tanh \left[0.016 A^{0.50} \exp(-120/A) \right]$	(verg.18)

Bijlage D: Modelresultaten variatie in initiële condities

Deze bijlage bevat toegevoegde illustratieve onderbouwingen voor de analyse in H5. De nummers van de paragrafen in deze bijlage komen overeen met de nummers van de paragrafen in H5.

D1. Algemeen effect (model)implementatie nevengeul

Eerst komen drie effectenschema's aan bod die de waterstandverhoging of verlaging in de hoofdgeul verklaren. Vervolgens zijn de dwars-stroomsnelheden weergegeven. De laatste zijn van belang voor de scheepvaart.

Effectenschema implementatie nevengeul

Een nevengeul kan leiden tot waterstandsdaling en stijging van de waterstand. Dit heft te maken met de combinative van twee factoren. Namelijk, een vergroot doorstroom oppervlak van de nevengeul (leidt tot daling waterniveau) en een afname van de transportcapaciteit in de hoofdgeul (leidt tot stijging waterniveau als gevolg van sedimentatie). Dit is illustratief weergegeven in de volgende drie schema's.



Schema 2. Bodemverandering referentiemodel (zwart profiel) bij variatie in debiet (Q; [m³/s]) t.o.v. initiële bodemligging (blauw profiel). Meer/minder sedimentatie/erosie is t.o.v. herverdeling bovenin schema.



Schema 3. Bodemverandering basismodel (rood profiel) bij variatie in debiet (Q; [m³/s]) t.o.v. initiële bodemligging (blauw profiel). Meer/minder sedimentatie/erosie is t.o.v. herverdeling bovenin schema.



Schema 4. Combinaties (Schema 2en Schema 3) bodemveranderingsituaties basis- en referentiemodel (respectievelijk rood en zwart prfiel), met bijbehorende mogelijke gevolgen voor de waterstand [m+NAP].



Dwars-stroomsnelheden



D2. Bifurcatiehoek



Verandering in breedtegemiddelde bodemligging hoofdgeul - gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur Bijlage -5. Verschil tussen breedtegemiddelde bodemligging van de hoofdgeul tussen verschillende bifurcatievarianten en het referentiemodel; waarden aan het eind van elk simulatiejaar. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Verandering in breedtegemiddeld waterniveau in de hoofdgeul bij Birfurcatievarianten

Figuur Bijlage -6. Verschil tussen breedtegemiddeld waterniveau [m+NAP] van de hoofdgeul bij verschillende bifurcatiehoekvarianten en het referentiemodel; waarden aan het eind van elk simulatiejaar. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

D3. Plek van aftakken in het kribvak

Bodemliggingverschil [m] eind jr 10 tussen "plek van aftak"-varianten en referentiemodel Focus op bodemliggingverschil [m] van enkel de nevengeul



Figuur Bijlage -7. Verschil in bodemligging van de nevengeul [m+NAP] tussen verschillende "plek van aftak"-varianten en het referentiemodel. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Verandering dwarsdoorsnede nevengeul en hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur Bijlage-8. Verandering bodemligging in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor verschillende "plek van aftak"-varianten. Midden onder: locatie dwarsdoorsnede in model. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Verandering in breedtegemiddeld waterniveau in de hoofdgeul bij "Plek van aftak"-varianten

Figuur Bijlage -9. Verschil tussen breedtegemiddeld waterniveau [m+NAP] van de hoofdgeul bij verschillende "plek van aftak"-varianten en het referentiemodel; waarden aan het eind van elk simulatiejaar. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



D4. Breedte/diepte-verhouding

Figuur Bijlage -10. Verandering van de bodemligging van de nevengeul, van breedtevariant 150m, t.o.v. de initiële bodemligging [m] voor verschillende jaren na aanleg. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Bodemliggingverschil [m⁺NAP] eind jr 10 tussen breedte/dieptevarianten en referentiemodel

Figuur Bijlage -11. Verschil in bodemligging van de hoofdgeul [m+NAP] tussen verschillende breedte/diepte-varianten en het referentiemodel. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Verandering in breedtegemiddeld waterniveau in de hoofdgeul gedurende 10 jaar na aanleg

Figuur Bijlage -12. Verschil tussen breedtegemiddeld waterniveau [m*NAP] van de hoofdgeul bij verschillende breedte/dieptevarianten en het referentiemodel; waarden aan het eind van elk simulatiejaar. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Figuur Bijlage -13. Verschil tussen breedtegemiddelde bodemligging van de hoofdgeul tussen verschillende instroomdrempelvarianten en het referentiemodel; waarden aan het eind van elk simulatiejaar. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

D6. Baggerindicatie

In deze paragraaf is eerst de methode voor de bepaling van het baggerniveau besproken, waarna illustraties zijn opgenomen als toevoeging voor de gedane terugkoppeling naar beheer en onderhoud in paragraaf 5.8.

Baggerniveau

Binnen dit onderzoek wordt gesproken van beheer- en onderhoud in termen van baggerwerkzaamheden. Het is echter ook mogelijk om sedimentbeheersende maatregelen toe te passen (Klop, Morfologische ontwikkelingen in sedimenterende nevengeulen: ontwerpparameters & sedimentbeheersende maatregelen, 2009).

Rijkswaterstaat is onder andere verantwoordelijk voor de waarborging van de diepte in de vaargeulen van de Nederlandse rivieren. Per ingreep wil de rivierbeheerder een schatting hebben van de hoeveelheid baggerwerk die deze met zich mee brengt; het baggerbezwaar. Regels hiervoor zijn via de wet vastgelegd in het Rivierkundig beoordelingskader (Kroekenstoel, 2009). Hierin staat dat de Overeengekomen Lage Rivierstanden (OLR), de rivierwaterstand is die gemiddeld 20 dagen per jaar worden onderschreden. De OLR is de rivierstand die optreedt bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) van 1020 m³/s Lobith; 818 m³/s voor de Waal. De minimale vaardiepte (=interventiediepte) die gegarandeerd moet worden, wordt uitgedrukt t.o.v. de OLR en verschilt per Rijntak. Op de Waal is dit OLR – 2.80 m. De onderhoudsdiepte ligt hier ca. 0.3 m onder.

Voor modelsimulaties betekent dit dat ter bepaling van het baggerniveau, elke vijf simulatiejaar een OLR moet worden bepaald. Dit gebeurt door de waterstand [m⁺NAP] af te lezen bij de afvoer van OLA. Dus elke vijf jaar van de simulatie moet een hydraulische som berekend worden met de afvoer die bij OLA hoort (Q=1020 m³/s bij Lobith; 818 m³/s voor de Waal). De gevonden waterstand is dan de nieuwe OLR. Op de Waal moet een vaardiepte gegarandeerd worden van 2,8 meter. Dus het is goed als de bodemligging [m⁺NAP] plus de gegarandeerde vaardiepte lager uitkomt dan de gevonden OLR, anders moet er gebaggerd worden. Binnen deze studie is OLR bepaling enkel aan het eind van de simulatie van 10 jaar uitgevoerd. De keuze hiervoor is tweeledig. Allereerst heeft het model een zekere inspeelperiode nodig om stabiel te worden. Ten tweede kan verondersteld worden dat als er na 10 jaar nog aan de eis wordt voldaan, het een beheer- en onderhoudsvrije variant is.

Opgemerkt moet worden dat hierbij niet met breedtegemiddelden gerekend kan worden. Het is immers zo dat aanzanding in een roostercel niet mag worden verrekend met een erosie kuil in een naburige roostercel.



Baggerindicatie [m t.o.v. baggerniveau] eind jr 10

Figuur Bijlage-14. Baggerindicatie in meters t.o.v. het baggerniveau; bepaald met behulp van de bodemligging aan het eind van de simulatie en het baggernivea (gebaseerd op de OLR). Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Universiteit Twente.


Baggerindicatie [m t.o.v. baggerniveau] eind jr 10

Figuur Bijlage-15. Baggerindicatie in meters t.o.v. het baggerniveau; bepaald met behulp van de bodemligging aan het eind van de simulatie en het baggernivea (gebaseerd op de OLR). Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Bijlage E: Modelresultaten stationaire benadering

Deze bijlage hoort bij H6. Eerst komt de berekening van de representatieve afvoer aan bod, waarna illustraties zijn opgenomen als toevoeging op de gepresenteerde analyse in H6.

Representatieve afvoer, de beste stationaire afvoerbenadering

De modelresultaten lijken een indicatie om aan te nemen dat de tijdsgemiddeld gekozen afvoer van 1547 m³/s de beste stationaire benadering zou kunnen zijn van de quasistationaire afvoerverdeling. In Tabel 9-1 is de berekening weergegeven. Van de zeven voorkomende afvoerniveaus is bepaald voor welk volume water zij zorgen. Het totaal volume is vervolgens gedeeld door het aantal seconden in een jaar: $Volume/tijd = 48772800000/31536000 = 1547 m^3/s$.

Q	t [dagen]	t [sec]	volume [m ³]	
900	105	9072000	8164800000	
1400	159	13737600	19232640000	
1900	51	4406400	8372160000	
2400	23	1987200	4769280000	
2900	13	1123200	3257280000	
3400	6	518400	1762560000	
4650	8	691200	3214080000	
		31536000	48772800000	

Tabel 9-1. Berekening tijdsgemiddelde afvoer van de quasistationaire afvoerhydrograaf (Figuur 6-2).



Figuur Bijlage-16. Verandering bodemligging in dwarsrichting van neven- en hoofdgeul voor de eerste acht simulatiejaren. In elk deelfiguur is de bodemligging weergegeven aan het eind van elke quasistationaire stap uit de afvoerhydrograaf (Figuur 6-2). Zie Figuur 5-3voor locatie dwarsprofiel.



Bodemligging quasistationair model jaar 4 [m t.o.v. uiterwaard]

Bodemligging eind quasistationaire stap minus uiterwaardniveau

Figuur Bijlage-17. Verandering van de bodemligging t.o.v. uiterwaardniveau [m] voor een quasistationair jaar. Per quasistationaire stap is een plot weergegeven. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).



Bodemligging quasistationair model jaar 4 [m t.o.v. uiterwaard] Bodemligging eind quasistationaire stap minus uiterwaardniveau

Figuur Bijlage-18. Verandering van de bodemligging van de nevengeul t.o.v. uiterwaardniveau [m] voor een quasistationair jaar. Per quasistationaire stap is een plot weergegeven. Het water stroomt van rechts naar links (oost naar west).

Universiteit Twente, oktober 2012 Inhoud: P.K. Schuurman Illustraties: M.H. Martens