

Morfologisch modelleren van nevengeulen in 2D

Afstudeerverslag over verschillen tussen 2D-, 1D- en analytische resultaten



November 2011

D.R. Van Putten

Morfologisch modelleren van nevengeulen in 2D

Afstudeerverslag over verschillen tussen 2D-, 1D- en analytische resultaten

November 2011

D.R. Van Putten

Afstudeercommissie

Drs. F. Hoefsloot (CSO)

Dr. ir. C.F. van der Mark (Deltares)

Dr. R.M.J. Schielen (Universiteit Twente)

Dr. ir J.S. Ribberink (Universiteit Twente)

Universiteit Twente

Faculteit Construerende Technische Wetenschappen

Water Engineering and Management

CSO



UNIVERSITY OF TWENTE.



Voorwoord

Ruim een jaar geleden ben ik begonnen met nadenken over mijn afstudeeropdracht. Als onderwerp wilde ik graag iets doen met hydraulica of morfologie. Daarbij leek dit me de uitgelezen kans om te ervaren hoe het is om bij een adviesbureau te werken. En dan ook nog het liefst in de buurt van mijn woonplaats Deventer.

Eigen pogingen om bij een adviesbureau in Deventer aan de slag te komen mislukten, en ik moest dus verder zoeken. Uit de afstudeeropdrachten'bak' van de Universiteit Twente kwam een leuke opdracht voorbij over de morfologische gevolgen van nevengeul. Dit paste precies binnen mijn interessegebied, dus het leek me verstandig mijn andere wensen te laten varen. Het bleek echter dat de opdracht uitgevoerd kon worden bij CSO, een adviesbureau uit Bunnik, waardoor ik dus toch bij een adviesbureau aan de slag kon. Eenmaal gesetteld bij CSO, kwam ik erachter dat het een nevenvestiging heeft in Deventer. Beter kon het niet, en ik heb de opdracht dan ook met veel plezier uitgevoerd.

Daarvoor wil ik mijn begeleiders bedanken. Als eerste Rolien van der Mark, voor de niet te missen kennis van Delft3D. Halverwege het onderzoek wist ik soms echt niet hoe ik het model aan de praat moest krijgen, maar in overleg met Rolien is dit toch gelukt. Ook je input tijdens overleggen is zeer nuttig geweest. Ralph Schielen wil ik bedanken voor het formuleren van de opdracht, en de kritische kanttekeningen bij de tussenproducten. Ook je gedachten met open einde, hebben me tot nadenken gezet, en dit heeft het verslag goed gedaan. Ook Jan Ribberink bedank ik voor de kritische kanttekeningen, en het feit dat jij aankwam met het uitvoeren van een convergentie-test. Hierdoor bleek er eindelijk een rooster te zijn waarin we wel vertrouwen kregen. Frans Hoefsloot bedank ik voor de begeleiding vanuit CSO. Ik heb er met veel plezier gewerkt, en heb je belangstelling in het verloop van mijn onderzoek erg gewaardeerd. Tevens wil ik hier Remko Hoendervoogt (CSO) bedanken voor de inhoudelijke feedback op het tussen- en eindproduct.

Uiteindelijk is het resultaat dit verslag geworden. Op de voorkant van het verslag is een impressie van de toekomstige nevengeul in Deventer weergegeven. Ik heb voor deze afbeelding gekozen, omdat hierin mijn woonplaats Deventer en een nevengeul in één beeld zijn gevangen. In deze afbeelding is met enige moeite is zelfs mijn huidige woning te ontdekken.

Deventer, November 2011

Samenvatting

In het rivierengebied in Nederland worden meer dan 30 maatregelen uitgevoerd in het kader van het project 'Ruimte voor de Rivier'. De doelstelling van dit project is de veiligheid tijdens hoogwaters te verhogen, en tevens de ruimtelijke kwaliteit te verbeteren. Een van de type maatregelen die voor dit project worden uitgevoerd, is het aanleggen van een nevengeul. Deze biedt naast de functionaliteit voor de veiligheid, ook volop kansen voor natuur. Nevengeulen vormen namelijk geschikte leefomstandigheden voor vele vissoorten en vegetatie, vanwege de relatief lage stroomsnelheden.

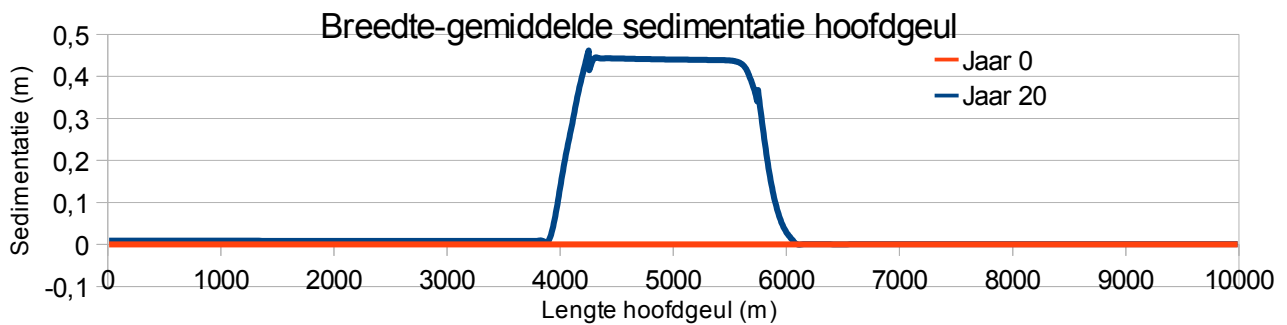
Het morfologische gedrag van een nevengeul is echter nog niet goed te voorspellen. Uit voorzorg is daarom de debietonttrekking van de nevengeul maximaal 3% van de hoofdgeul. Tevens zijn de richtlijnen voor het ontwerp van een nevengeul erop gericht dat de nevengeul (licht) sedimenteert. Hiermee wordt voorkomen dat de nevengeul erodeert, wat zou zorgen voor extra sedimentatie in de hoofdgeul, en daarmee belemmering voor scheepvaart.

Een eerste aanzet om het gedrag van nevengeulen te modelleren is gedaan door Klop (2009). Dit heeft hij zowel analytisch als numeriek gedaan. Voor het numerieke gedeelte heeft hij gebruik gemaakt van het 1D-model SOBEK. In dit model wordt de sedimentverdeling over hoofd- en nevengeul bepaald door een splitsingspuntrelatie. In deze relatie is de verhouding van specifiek sediment transport gelijk aan de verhouding van specifieke afvoer, tot een bepaalde macht 'Y'. In deze parameter kunnen geometrische en fysische kenmerken echter niet kwantitatief worden meegenomen. Een optimaal ontwerp, waarbij de onderhoudskosten beperkt blijven, is hierdoor niet te produceren. Wel kunnen tijdschalen waarop onderhoud nodig is in kaart worden gebracht. Hieruit blijkt dat een verkeerd ontwerp kan leiden tot volledige sedimentatie binnen 10 jaar, wat een onwenselijke situatie is wat betreft onderhoudskosten.

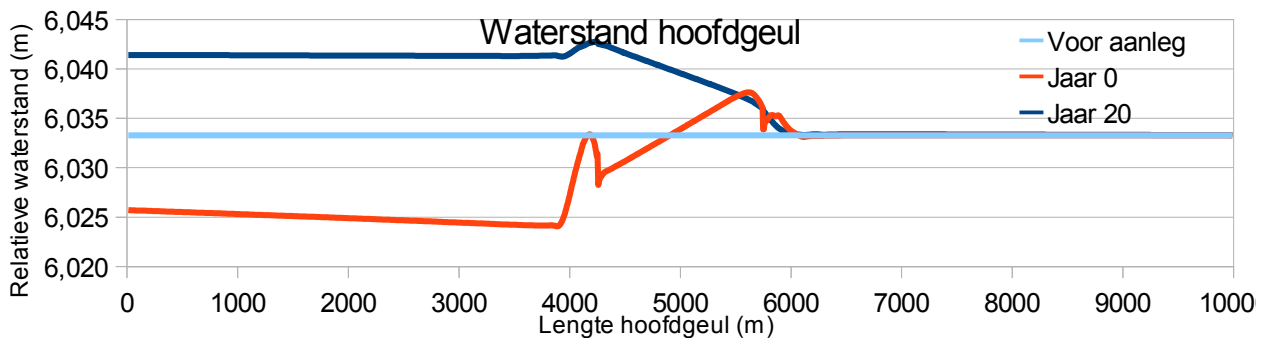
In dit onderzoek is gewerkt met de 2D-module van Delft3D. In dit programma wordt de sedimentverdeling niet bepaald door een splitsingspuntrelatie, maar op basis van geometrische en fysische kenmerken. In dit programma worden de processen meegenomen die het morfologische gedrag rondom nevengeulen beïnvloeden. Delft3D is daarom geschikt om de invloed van geometrische en fysische kenmerken op het morfologische gedrag in kaart te brengen. Hiervoor is als eerste een basisvariant ontworpen, waarvan condities voor de hoofdgeul vergelijkbaar zijn met de Waal (qua breedte, verhang, afvoer, etc.). De nevengeul is daarna ontworpen op basis van de huidige ontwerprichtlijnen.

Het 2D-gedrag in de hoofdgeul van de basisvariant is vergelijkbaar met gedrag dat door Kleinhans et al. (2008) is waargenomen in hun onderzoek naar splitsingen in 3D-modellering. Benedenstrooms van de nevengeul ontstonden alternerende banken (25cm hoogte), die zich in de eerste jaren naar benedenstrooms bewegen. Nadat deze in enkele jaren uit het domein zijn gemigreerd, blijken zich vaste banken (10cm hoogte) te ontwikkelen. Dit is in beide onderzoeken geconstateerd. Een andere constatering van dit onderzoek is dat benedenstrooms van de nevengeul een erosiekuil ontstaat, direct na de aanleg. Eén jaar na aanleg beweegt deze kuil zich naar benedenstrooms. Het blijkt dat de bodemhoogte van hoofd- en nevengeul na 15 jaar niet meer veranderen. Er kan dus geconcludeerd worden dat er na 15 jaar een evenwichtssituatie is bereikt.

De uiteindelijke sedimentatie in de hoofdgeul, en de daarbij horende verandering in de waterstand zijn in de volgende twee figuren weergegeven. Deze zijn vertaald naar breedte-gemiddelde waarden, zodat de vergelijking met analytische en 1D studies eenvoudiger is.



Afbeelding 1: Sedimentatie in de hoofdgeul. De nevengeul ligt tussen 4250m-5750.



Afbeelding 2: Relatieve waterstand: de waterstand minus de oorspronkelijke bodemhoogte.

De eerste afbeelding laat zien dat in de hoofdgeul bovenstrooms lichte sedimentatie optreedt (8,7mm). Het middengedeelte van de hoofdgeul geeft sterke sedimentatie (44cm) en een verhoging van het verhang. De sterke sedimentatie hangt samen met de sterke erosie in de nevengeul. Benedenstrooms treedt er geen sedimentatie of erosie op. Wordt er dan gekeken naar de waterstand dan is te zien dat de nevengeul direct na aanleg een waterstandsval bovenstrooms oplevert van maximaal 9,2mm. Door de morfologische ontwikkelingen levert dit echter na 20 jaar een nieuw evenwicht op, waarbij bovenstrooms waterstandsverhoging optreedt (8,7mm). Deze resultaten komen overeen met de analytische evenwichtsmorfologie, zoals beschreven in Ribberink (2006). Er kan dus geconcludeerd worden dat op de lange termijn een meestromende nevengeul contraproductief is: het zorgt dan namelijk voor een waterstandsverhoging in de hoofdgeul.

De nevengeul voert initieel 3% van het debiet uit de hoofdgeul af, en is 3,5m hoger aangelegd dan de hoofdgeul. Het blijkt dat de nevengeul sterk erodeert, met 2,6m, en hierdoor uiteindelijk 9,6% van het debiet in de hoofdgeul afvoert. In vergelijking met Klop (2009) en de huidige praktijk is dat erg veel. Dit heeft voornamelijk te maken met de kleine bifurcatiehoek. Hierdoor wordt er meer debiet richting de nevengeul gestuurd dan de afvoercapaciteit, waardoor erosie optreedt.

Bij het onderzoeken van individuele parameters, bleken er twee invloed te hebben op het morfologische gedrag. Dit zijn een bovenstroomse bocht, en de bifurcatiehoek. De invloed van de bifurcatiehoek kan worden verklaard doordat deze bepaalt hoeveel debiet er richting de nevengeul wordt geleid. De invloed van een bovenstroomse bocht kan worden verklaard aan de hand van de bodemhoogte bij de instroomopening van de nevengeul. Hierbij leidt een grote bodemhoogte bij de instroomopening tot een grote bodemhoogte in de nevengeul, en een kleine bodemhoogte bij de instroomopening tot een kleine bodemhoogte in de nevengeul. Het is gebleken dat parameters voor spiraalstroming en dwarshellingsseffecten, en de sedimentgrootte het morfologische gedrag niet beïnvloeden.

Worden deze resultaten vergeleken met eerder 1D onderzoek van Klop (2009), dan blijken er belangrijke verschillen tussen te zitten. Zo blijkt de macht in de splitsingspuntrelatie (zoals gebruikt in 1D) niet constant te zijn in de tijd. Hiervan wordt wel uitgegaan bij 1D onderzoek, wat dus onjuist is. Voor de simulaties binnen dit onderzoek blijkt dat hierdoor de morfologische verandering in 1D trager te verlopen dan bij 2D. Hierdoor is 1D dus niet geschikt om tijdschalen van morfologische veranderingen in kaart te brengen. Verder blijkt uit 1D onderzoek dat een kleine waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie ($< n/3$) altijd leidt tot instabiliteit, met volledige verzanding van de nevengeul tot gevolg. In dit onderzoek zijn er echter diverse simulaties geweest, waarvoor de waarde van de macht gedurende het grootste gedeelte van de kleiner is dan $n/3$. Toch is bij geen enkele simulatie volledige verzanding van een geul waargenomen, terwijl dit volgens 1D onderzoek wel zou moeten.

Op basis van deze constatering kan geconcludeerd worden dat meestromende nevengeulen voortaan beter met 2D geanalyseerd kunnen worden.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	4
Samenvatting.....	5
Lijst van symbolen.....	9
1 Inleiding.....	10
2 Achtergrond.....	12
2.1 Stabiliteit splitsingen (1D).....	12
2.2 Stabiliteit splitsingen (3D).....	13
2.3 Stabiliteit nevengeulen (1D).....	13
2.4 Morfologisch gedrag bestaande nevengeulen.....	15
3 Processen in nevengeulen.....	17
3.1 Processen zonder uiterwaardstroming.....	17
3.2 Processen met uiterwaardstroming.....	19
4 Aanleg, beheer en onderhoud.....	20
4.1 Huidige ontwerprichtlijnen	20
4.2 Beheers- en onderhoudsmaatregelen.....	21
5 Model beschrijving Delft3D	22
5.1 Waterbeweging.....	22
5.2 Rooster.....	23
5.3 Spiraalstroming.....	24
5.4 Sediment transport.....	25
6 Basisvariant.....	28
6.1 Invoer.....	28
6.2 Convergentietest.....	30
6.3 Morfologische factor.....	30
6.4 Resultaat hoofdgeul.....	32
6.5 Resultaat nevengeul	38
7 Invloed individuele parameters.....	41
7.1 Dwarshellingseffect.....	41
7.2 Spiraalstroming.....	41
7.3 Sedimentgrootte	42
7.4 Bifurcatiehoek.....	42
7.5 Buitenbocht.....	43
7.6 Binnenbocht.....	44
7.7 Tijdschalen.....	46
7.8 Samenvatting.....	46
8 Vergelijking 1D/2D.....	48
8.1 Sedimentatie versus erosie.....	48
8.2 Macht in splitsingspuntrelatie in de tijd.....	48
8.3 Geen instabiliteit in 2D.....	49
8.4 Relatie waterdiepte en exponent splitsingspuntrelatie.....	50
8.5 Modelleren meestromende nevengeul in 1D/2D.....	51
9 Discussie.....	53
9.1 Aannames basisvariant.....	53
9.2 Overig discussiepunten.....	55
10 Conclusies en aanbevelingen.....	59
10.1 Conclusies.....	59
10.2 Aanbevelingen.....	62
Literatuurlijst.....	63
Bijlage I: $Q_{s, cap} \sim Q_n/3$	65
Bijlage II: Resultaten met Meyer-Peter-Mueller.....	66
Bijlage III Problemen met Delft3D.....	67
Bijlage IV: Bodemligging nevengeul	69
Bijlage V: Instroomopening in de tijd.....	71
Bijlage VI: Eerder evenwicht in 2D tov 1D.....	72
Bijlage VII: Analytische evenwichtssituatie.....	73

Lijst van symbolen

α_s	= vermenigvuldigingsfactor voor een langshelling [-]
α_{bn}	= calibratieparameter voor dwarshellingseffect [-]
α_{bs}	= calibratieparameter voor langshellingseffect [-]
α	= calibratieparameter op sedimenttransport [-]
β_c	= calibratieparameter op intensiteit spiraalstroming [-]
Δ	= relatieve dichtheid van sediment [-]
ζ	= waterstand ten opzichte van referentieniveau [m]
θ_{cr}	= kritische Shields parameter [-]
θ_i	= Shields parameter [-]
κ	= Von Kármán constante [-]
ν_v	= kinematische viscositeit [m ² /s]
ρ	= dichtheid [kg/m ³]
σ	= verticale coördinaat [-]
τ_{bx}, τ_{by}	= bodemschuifspanning [kg/ms ²]
A_{sh}	= calibratieparameter op dwarshellingseffect [-]
B_i	= breedte van geul [m]
B_{sh}	= calibratieparameter op dwarshellingseffect [-]
C	= Chezy-coëfficiënt [m ^{0.5} /s]
C_{sh}	= calibratieparameter op dwarshellingseffect [-]
D_i	= diameter van sedimentfractie i [m]
D_m	= gemiddelde sedimentdiameter [m]
D_{sh}	= calibratieparameter op dwarshellingseffect [-]
D_{50}	= mediane korrelgrootte [m]
E_{spir}	= calibratie parameter voor spiraalstroming [-]
F_x, F_y	= horizontale Reynolds spanningen [m/s ²]
g	= zwaartekracht versnelling [m/s ²]
h	= waterdiepte [m]
I	= intensiteit van de spiraal stroming.
M_x, M_y	= variabelen voor de onttrekking of toevoeging van impuls [m/s ²]
n	= coördinaat dwars op de richting van de stroming
n	= macht in de splitsingspuntrelatie
P	= druk [kg/ms ²]
P_x, P_y	= hydrostatische druk in x/y-richting [kg/ms ²]
Q_s	= sedimenttransport [m ³ /s]
q_s	= specifiek sedimenttransport [m ³ /s]
Q	= debiet [m ³ /s]
q	= specifiek debiet [m ² /s]
$S_{b,n}$	= grootte van het dwarstransport van sediment [kg/m/s]
$S'_{b,n}$	= grootte van het bodem-transport inclusief langshellingseffecten [kg/m/s]
S''	= grootte van het bodem-transport volgens bodem-transport formule [kg/m/s]
s	= coördinaat in de richting van de stroming [-]
t	= tijd [s]
u	= diepte-gemiddelde snelheid in x-richting [m/s]
U_s	= stroomsnelheid langs de stromingsrichting [m/s]
U_r	= stroomsnelheid dwars op de stromingsrichting [m/s]
v	= diepte-gemiddelde snelheid in y-richting [m/s]
x	= coördinaat in de lengterichting [-]
y	= coördinaat in de breedterichting [-]
Y	= exponent in de splitsingspuntrelatie [-]
z	= bodemhoogte boven referentieniveau [m]

1 Inleiding

In het kader van Ruimte voor de Rivier worden meer dan 30 projecten uitgevoerd langs het rivierengebied in Nederland. Hierdoor kan er meer water worden afgevoerd door de rivieren. Dit verhoogt de veiligheid tegen overstromingen tijdens hoogwaters. Daarnaast is de nevensdoelstelling van het project om de ruimtelijke kwaliteit te verbeteren.

Een van de type maatregelen die wordt toegepast is het aanleggen van een nevengeul. Dit is een type geul die parallel gelegen is aan de hoofdgeul. Naast de functionaliteit van de maatregel wat betreft waterstandsverlaging en veiligheid, biedt deze ook kansen voor natuur. Nevengeulen bieden namelijk geschikte leefomstandigheden voor vele vissoorten en vegetatie, vanwege de relatief lage stroomsnelheden (Wolters et al., 2001) en (Simons et al., 2000).

De vraag is echter hoe duurzaam de aanleg van een nevengeul is. Uit onderzoek van Klop (2009) blijkt dat een verkeerde aanleg van een nevengeul kan leiden tot volledige sedimentatie binnen 10 jaar. Aangezien deze nevengeulen voor de veiligheid worden aangelegd, dienen deze op diepte te blijven. Volledige sedimentatie, betekent dan ook dat de nevengeul opnieuw aangelegd moet worden. Dit is in verband met onderhoudskosten een onwenselijke situatie.

Het onderzoek van Klop (2009) is gedaan met het SOBEK (1D) model van de Waal. Hierin wordt de verdeling van sediment over hoofd- en nevengeul (bij het bovenstroomse splitsingspunt van de nevengeul) berekend met de splitsingspuntrelatie van Wang et al. (1995). Het is in deze relatie niet mogelijk geometrische en fysische kenmerken van het splitsingspunt kwantitatief te verwerken. Wel is het mogelijk om met SOBEK tijdschalen te bepalen waarop sedimentatie optreedt, wat dus ook door Klop (2009) is gedaan.

Dit onderzoek, als vervolg op Klop (2009), heeft zich gericht op het 2-dimensionaal modelleren van het morfologische gedrag van nevengeulen in Delft3D. Bij het 2D-modelleren kunnen geometrische en fysische parameters namelijk wel worden meegenomen. Zo kan de invloed van deze parameters in kaart worden gebracht, en de optimale ligging van nevengeulen worden bepaald. Onder de optimale ligging wordt verstaan het zodanig aanleggen dat de onderhoudskosten worden geminimaliseerd. Het oorspronkelijke doel van dit onderzoek was dan ook:

Het opstellen van ontwerpregels voor het morfologische gedrag van nevengeulen voor de optimalisatie van aanleg, beheer en onderhoud van nevengeulen, door gebruik te maken van Delft3D.

Helaas is het zover niet gekomen binnen dit onderzoek. Wel is het gelukt om een nevengeul in Delft3D te modelleren, en de resultaten hiervan te vergelijken met resultaten van eerdere analytische en 1D-onderzoeken en met huidige nevengeulen in Nederland. Ook is de invloed van diverse parameters in kaart gebracht. Er zijn echter ook nog diverse parameters niet meegenomen binnen dit onderzoek wegens tijdgebrek. Het opstellen van ontwerpregels is dan ook niet gelukt.

Binnen dit onderzoek is antwoord gegeven op de volgende onderzoeksvragen.

1. In hoeverre is Delft3D geschikt om nevengeulen te modelleren?
2. Wat is de morfologische en hydraulische ontwikkeling van hoofd- en nevengeul op de korte en lange termijn?
3. Wat is de invloed van individuele parameters op de morfologische ontwikkeling?
4. Voldoen de huidige ontwerprichtlijnen voor nevengeulen?
5. Hoe verhouden de resultaten van dit onderzoek zich met eerder onderzoek?

Leeswijzer

Dit verslag is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 is de achtergrond van dit onderzoek beschreven over eerder onderzoek naar nevengeulen en splitsingen. Hierin komen analytische studies, 1D-studies en 3D-studies terug. Tevens is hierin de huidige ervaringen met aangelegde nevengeulen beschreven. Vervolgens zijn in hoofdstuk 3 de processen beschreven die de sedimentinstroom of transportcapaciteit van een nevengeul beïnvloeden. Deze twee bepalen de morfologische ontwikkeling van een nevengeul. Hoofdstuk 4 beschrijft de huidige ontwerprichtlijnen voor nevengeulen. Deze schrijven voor dat nevengeulen moeten worden aangelegd met de neiging tot sedimentatie. In hoofdstuk 5 volgen de vergelijkingen die in Delft3D worden gebruikt. Hoofdstuk 6 beschrijft het ontwerp en resultaat van de basisvariant. Hierin wordt zowel ingegaan op het 2D-gedrag, als de breedte-gemiddelde resultaten. In hoofdstuk 7 is de gevoeligheid van diverse parameters onderzocht. In hoofdstuk 8 staat een vergelijking van de resultaten van dit onderzoek met de resultaten van het eerdere 1D onderzoek van Klop (2009) beschreven. In hoofdstuk 9 staat een discussie van de resultaten met betrekking tot enkele aannames die gedaan zijn binnen dit onderzoek. Tot slot staan in hoofdstuk 10 de conclusies en aanbevelingen.

2 Achtergrond

Dit hoofdstuk beschrijft de achtergrond van dit onderzoek. Hierin is de huidige kennis uit literatuur verwerkt. Dit begint met de stabiliteit van splitsingen uit het 1-dimensionale onderzoek van Wang et al. (1995). Eenzelfde splitsing is ook bekeken door Kleinhans et al. (2008), maar dan in een 3D-onderzoek. De resultaten hiervan zijn beschreven in paragraaf 2.2. Vervolgens is het onderzoek van Klop (2009) beschreven, die zowel analytisch als 1-dimensionaal naar nevengeulen heeft gekeken. Tot slot staat in paragraaf 2.4 beschreven wat de morfologische ontwikkelingen van aangelegde nevengeulen zijn.

2.1 Stabiliteit splitsingen (1D)

Een nevengeul onttrekt water en sediment van de hoofdgeul. De verhouding van deze twee grootheden is van belang voor het morfologische gedrag van hoofd- en nevengeul. Een eerste aanzet om dit gedrag 1-dimensionaal te voorspellen is gedaan door Klop (2009). Hierbij is gebruik gemaakt van het onderzoek van Wang et al. (1995) naar de morfologische ontwikkelingen splitsingen. Hoewel een splitsing niet gelijk is aan een nevengeul, kan het bovenstroomse splitsingspunt van een nevengeul wel benaderd worden als een splitsing. Daarom zijn in deze paragraaf de resultaten van het onderzoek van Wang et al. (1995) beschreven.

Wang et al. (1995) hebben een stabiliteitsanalyse uitgevoerd op analytische vergelijkingen. De resultaten hiervan zijn geverifieerd met het 1D-model SOBEK.

De verdeling van sediment op het splitsingspunt over beide geulen wordt door Wang et al. (1995) bepaald met Vergelijking (1).

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{(1-Y)} \quad (1)$$

Waarbij

Q_{si} = Sedimenttransport richting geul i [m^3/s]

Q_i = Debiet naar geul i [m^3/s]

B_i = Breedte van geul i [m]

Y = macht in de splitsingspuntrelatie [-]

$i=1,2$ = Geul 1 en geul 2, beiden benedenstrooms van de splitsing

Wang et al. (1995) merken op dat met deze formule feitelijk de verhouding van specifiek transport gerelateerd is aan de verhouding van specifieke afvoer tot de macht 'Y' (door het wegwerken van de verhouding $(B_1/B_2)^{(1-Y)}$).

De morfologische ontwikkeling per benedenstroomse geul wordt bepaald door het verschil tussen de sedimentinstroom en de transportcapaciteit. Deze beide zijn gerelateerd aan het debiet door de geul: $Q_{s,in} \sim Q^Y$ en $Q_{s,cap} \sim Q^{n/3}$ (n is de macht in de sedimenttransportformule). De relatie van de sedimentinstroom blijkt uit Vergelijking (1). De relatie van de transportcapaciteit kan worden afgeleid door het uitwerken van de volgende vergelijkingen: $Q_s = Bmu^n$, $u = C(hi)^{0.5}$ en $Q = Bhu$. De uitwerking hiervan staat in Bijlage I. De morfologische reactie kan in twee regimes worden onderverdeeld: $Y < n/3$ en $Y > n/3$. Voor deze regimes is in kaart gebracht wat de reactie is op een morfologische verandering (erosie of sedimentatie).

$Y < n/3$

Wanneer in een geul de transportcapaciteit groter is dan de sedimentinstroom, treedt er erosie op. Hierdoor neemt het debiet in de geul toe en daarmee ook de sedimentinstroom en transportcapaciteit. Op basis van de relatie tussen sedimenttransport en debiet ($Q_{s,in} \sim Q^Y$ en $Q_{s,cap} \sim Q^{n/3}$) blijkt dat voor ' $Y < n/3$ ' de transportcapaciteit sterker zal toenemen dan de sedimentinstroom. Hierdoor zal de erosie verder toenemen.

Evenzo geldt, dat als in een geul de sedimentinstroom groter is dan de transportcapaciteit, er verzanding optreedt. Hierdoor neemt het debiet af, waardoor zowel de sedimentinstroom als de transportcapaciteit dalen. De transportcapaciteit zal echter sneller dalen, waardoor nog meer sedimentatie optreedt.

Een verstoring (sedimentatie of erosie) wordt dus altijd versterkt. Dit proces stopt pas wanneer één van beide geulen volledig verzand is.

$Y > n/3$

Wanneer de sedimentinstroom in één geul is groter dan de transportcapaciteit, treedt er verzanding op. Hierdoor neemt het debiet naar de geul af, waardoor zowel de sedimentinstroom als de transportcapaciteit afnemen. De sedimentinstroom zal echter sterker afnemen, waardoor de sedimentatie omslaat in erosie. In de andere geul gebeurt precies het omgekeerde. Beide geulen schommelen dus rondom een evenwichtssituatie heen, en blijven beide open.

In formule-vorm kan dit worden weergegeven als:

$$\left| \frac{dQ_{\sin}}{dQ} \right| < \left| \frac{dQ_{s, cap}}{dQ} \right| \text{ voor } Y > n/3 \text{ (instabiel)} \quad (2)$$

$$\left| \frac{dQ_{\sin}}{dQ} \right| > \left| \frac{dQ_{s, cap}}{dQ} \right| \text{ voor } Y > n/3 \text{ (stabiel)} \quad (3)$$

Bij het tweede regime ($Y > n/3$) treedt er een stabiel evenwicht op en blijven altijd beide geulen open. Dit komt omdat verstoringen hersteld worden. Bij het eerste regime ($Y < n/3$) treedt er een instabiel evenwicht op, en zal altijd één van beide geulen volledig verzanden. Dit komt omdat verstoringen niet hersteld worden, maar juist versterkt worden.

2.2 Stabiliteit splitsingen (3D)

In 2008 hebben Kleinhans et al. onderzoek gedaan naar de stabiliteit van splitsingen met Delft3D, gebruik makend van 3-dimensionale simulaties. Hierdoor konden dus geometrische en fysische parameters kwantitatief worden onderzocht. In het onderzoek van Kleinhans et al. (2008) is onderzoek gedaan naar een splitsingspunt met een meander bovenstrooms en twee initieel gelijke geulen benedenstrooms.

Een eerste belangrijke conclusie is dat de macht in de splitsingspuntrelatie zoals door Wang et al. (1995) niet constant is in de tijd. Dit is van grote invloed op het uiteindelijke morfologische evenwicht. De resultaten van 1D-studies moeten dus met enige voorzichtigheid worden gebruikt.

Een tweede conclusie van de auteurs is dat een van beide geulen altijd sterk sedimenteert, en de ander sterk erodeert. Toch blijven beide open, met een sterk asymmetrische afvoerverdeling. Het bodempeil van de sedimenterende geul wordt namelijk zo hoog ten opzichte van de eroderende geul dat sediment steeds moeilijker de sedimenterende geul instroomt. Hierdoor vermindert de (relatieve) instroom van sediment richting de sedimenterende geul, en deze blijft dus open. Wel bleek er een groot verschil te zitten in tijdschalen waarop een asymmetrisch evenwicht zich volledig heeft ontwikkeld. Dit varieerde tussen 20 en 200 jaar.

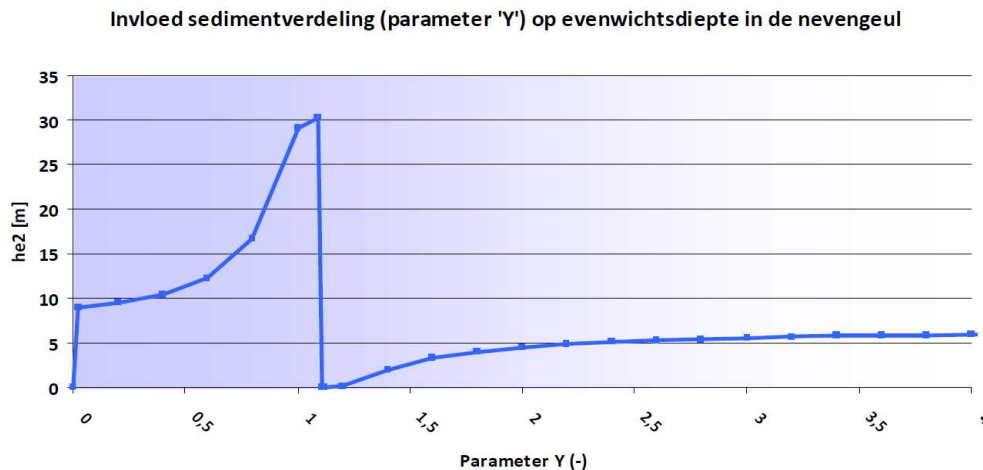
2.3 Stabiliteit nevengeulen (1D)

Klop (2009) heeft onderzoek gedaan naar de stabiliteit van nevengeulen. Hierbij heeft hij enerzijds een analytische evenwichtsstudie gedaan, en anderzijds een numerieke analyse met SOBEK (1D). De gebruikte splitsingspuntrelatie is die van Wang et al. (1995), zoals hiervoor al is beschreven.

2.3.1 Analytische evenwichtsanalyse

Voor de analytische evenwichtsanalyse heeft Klop (2009) de waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie gevarieerd. Als invoergegevens voor debiet, breedte, etc. heeft hij gebruik gemaakt van de nevengeul van Gameren.

Uit deze analyse is gebleken dat rondom de kritieke waarde van macht van splitsingspuntrelatie (rond $n/3$) de grootste morfologische veranderingen optreden. Naarmate de macht groter of kleiner wordt dan de kritieke waarde neemt de grootte van de morfologische reactie af, zie Afbeelding 3.



Afbeelding 3: Evenwichtswaterdiepte in de nevengeul afhankelijk van de macht van de splitsingspuntrelatie ('Y'), op basis van analytisch onderzoek, uit Klop (2009). De grootste en kleinste waterdiepte treden op rond $Y=n/3$ (in dit onderzoek $n=3,33$). Grotere én kleinere waarden van Y resulteren in kleinere morfologische reacties.

Klop (2009) deelt de resultaten uit Afbeelding 3 in drie categoriën: ' $Y < n/3$ ', ' $n/3 < Y < n$ ' en ' $Y > n$ '. De eerste geeft instabiliteit, de tweede sedimentatie, en de derde erosie. Merk op dat sedimentatie en erosie afhankelijk zijn van de aanleghoogte, en dit onderscheid door Wang et al. (1995) niet wordt meegenomen.

$Y < n/3$

Voor ' $Y < n/3$ ' voorspelt de analytische evenwichtsstudie dat de nevengeul openblijft, maar wel een zeer grote evenwichtsdiepte kent. Dit is in tegenspraak met de stabiliteitsanalyse van Wang et al. (1995), die aan heeft getoond dat bij dit regime altijd één van beide geulen verzand. Klop (2009) geeft aan dat in de stabiliteitsanalyse van Wang et al. (1995) ook de morfologische reactie op verstoringen worden onderzocht, wat bij zijn eigen evenwichtsstudie niet mogelijk is. Uit de reactie op verstoringen blijkt het evenwicht instabiel te zijn. Klop (2009) neemt daarom de resultaten van Wang et al. (1995) voor dit regime over, en verwacht daarom altijd volledige sedimentatie van één van beide geulen voor dit regime.

$n/3 < Y < n$

Het tweede regime is ' $n/3 < Y < n$ '. De stabiliteitsanalyse van Wang et al. (1995) toont aan dat verstoringen worden hersteld, en dat beide geulen openblijven. Dit is ook het geval bij de evenwichtsanalyse van Klop (2009). Uit de zijn analyse blijkt dat de evenwichtswaterdiepte vrij klein is (zie Afbeelding 3). Daarom stelt hij dat sedimentatie verwacht kan worden.

$Y > n$

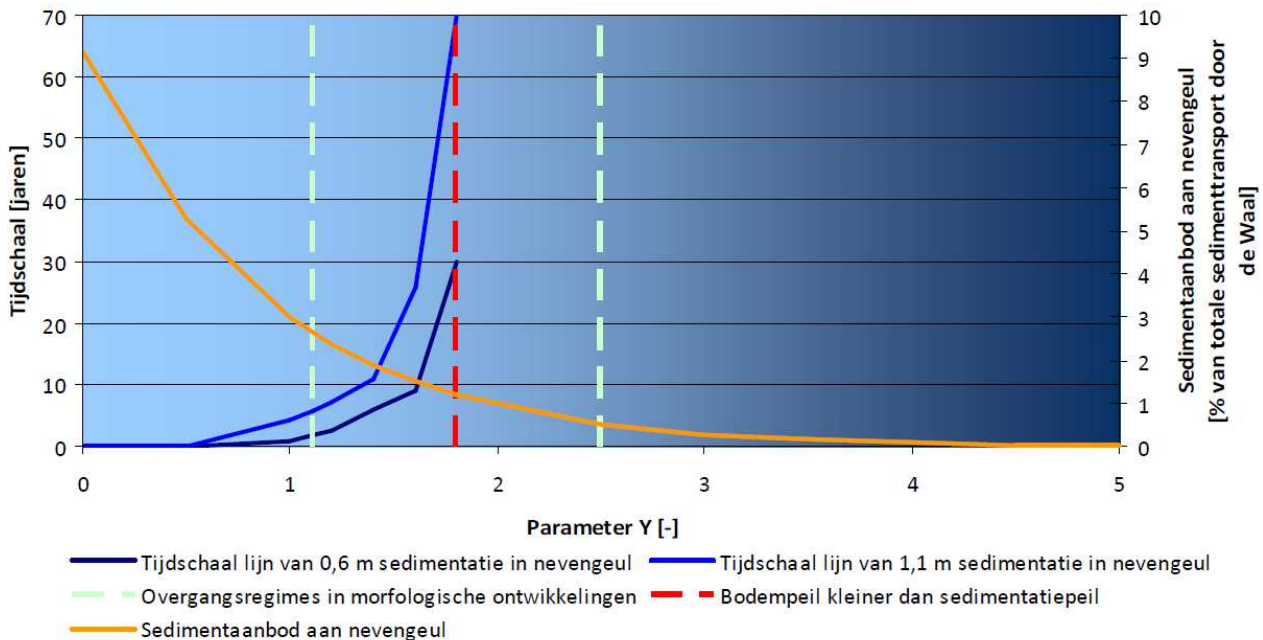
Het derde regime is ' $Y > n$ '. Op basis van de stabiliteitsanalyse van Wang et al. (1995) kan geconcludeerd worden dat er een stabiel evenwicht optreedt, aangezien dit immers geldt voor elke $Y > n/3$. De evenwichtsdiepte is voor dit regime vrij groot (zie Afbeelding 3), waardoor Klop (2009) stelt dat erosie verwacht kan worden.

2.3.2 Numerieke analyse

Voor een numerieke analyse heeft Klop (2009) SOBEK (1D) gebruikt. Hierin wordt dezelfde splitsingspuntrelatie gebruikt als Wang et al. (1995). Zoals al duidelijk is geworden uit het analytische onderzoek heeft de macht van de splitsingspuntrelatie hierin een grote invloed op het uiteindelijke resultaat. Het is echter (nog) niet mogelijk om geometrische en fysische kenmerken van hoofd- en nevengeul kwantitatief te vertalen naar een waarde voor deze macht. Dat betekent dat op basis van een geometrie geen voorspelling kan worden gedaan van het optredende morfologische gedrag. Wel kan met behulp van 1D-modellen de tijdschalen in kaart worden gebracht van morfologische veranderingen, door SOBEK voor diverse waarden voor de macht in de splitsingspuntrelatie door te rekenen. Binnen het onderzoek van Klop (2009) is dat gedaan om te onderzoeken hoe lang het duurt

voordat onderhoud nodig is in nevengeulen (zie Afbeelding 4). Hierbij is de nevengeul van Gameren onderzocht, die initieel 3,5m hoger dan de hoofdgeul is aangelegd. Onderhoud zou nodig zijn bij 0,6m sedimentatie, of 1,1m sedimentatie.

Tijdschaal resultaten van SOBEK (80 jaar) simulaties versus 0,6 meter sedimentatie (1 m+NAP) en 1,1 meter sedimentatie (1,5 m+NAP) in de SOBEK nevengeul



Afbeelding 4: Tijdschalen waarop onderhoud nodig is, afhankelijk van de macht in de splitsingspuntrelatie. De aanleghoogte van de nevengeul is 3,5m hoger dan de hoofdgeul. Voor deze simulatie geldt $n=3.3$, wat leidt tot $Y=n/3=1.1$. Uit Klop (2009).

Deze afbeelding laat zien dat de range van tijdschalen er groot is. Voor $Y < n/3$ (hier 1.1) is binnen 10 jaar onderhoud nodig. Voor $1.1 < Y < 1.8$ is onderhoud nodig tussen 3 en 70 jaar. Voor $Y > 1.8$ treedt erosie op (de aanleghoogte van de nevengeul is 3,5m hoger dan de hoofdgeul), en is onderhoud in de nevengeul niet nodig.

Deze resultaten tonen aan dat bij een verkeerde aanleg ($Y < 1.1$, instabiele situatie), binnen tien jaar onderhoud nodig zijn. Aangezien onderhoud kostbaar is, is het wenselijk dit zoveel mogelijk te voorkomen of te beperken. Omdat geometrische en fysische kenmerken niet verwerkt kunnen worden, is het niet mogelijk om te bepalen hoe een nevengeul ideaal kan worden aangelegd met 1D-onderzoek. Een belangrijke aanbeveling van het onderzoek van Klop (2009) is dan ook nevengeulen te modelleren in 2D/3D, wat in dit onderzoek is uitgevoerd.

2.4 Morfologisch gedrag bestaande nevengeulen

Van de nevengeulen die momenteel al zijn aangelegd zijn er drie enkele jaren morfologisch gemonitord. Dit zijn de nevengeulen van Beneden Leeuwen, Opijnen en Gameren. De eerste twee geulen blijken morfologisch stabiel (Simons et al., 2000). Bij de nevengeul van Beneden Leeuwen komt dit door een kleine sediment-instroom, in combinatie met een kleilaag. De kleine sediment-instroom wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een zandvang aan het begin van de nevengeul. Door de cohesieve kleilaag treedt er geen erosie op. De nevengeul in Opijnen is morfologisch stabiel, doordat zowel de sedimentinstroom, als de transportcapaciteit klein is. De kleine sediment-instroom wordt veroorzaakt door de aanleg van de instroomopening in een buitenbocht van de Waal, en de kleine transportcapaciteit door de kleine debiet-onttrekking (1% van de hoofdgeul). Hoewel deze nevengeul morfologisch stabiel is, is deze wel morfologisch actief. Tijdens hoogwaters wordt er namelijk sediment afgezet, wat wordt weggespoeld tijdens lagere afvoeren.

Bij Gameren is het beeld wat complexer. Hier zijn drie nevengeulen aangelegd (de Grote geul, de Oost geul en de West geul), waardoor sedimentinstroom naar één geul de sedimentinstroom naar de andere geulen beïnvloedt. Daarbij zijn er in de Grote geul lokaal grote verschillen (smalle brug, brede sedimentvang), die het bemoeilijken het morfologische gedrag van de geul als geheel te bekijken. Uit onderzoek van Jans et al. (2004) blijkt dat er gemiddeld enige sedimentatie plaatsvindt in deze geulen.

3 Processen in nevengeulen

Het morfologische gedrag van nevengeulen wordt veroorzaakt door een verschil tussen de transportcapaciteit en het sedimentaanbod. De transportcapaciteit van een nevengeul wordt bepaald door de stroomsnelheid. De stroomsnelheid wordt bepaald door het debiet, de breedte, diepte, het verhang en de ruwheid van de nevengeul. De sedimentinstroom naar de nevengeul wordt bepaald door diverse processen. Deze processen zijn in dit hoofdstuk beschreven.

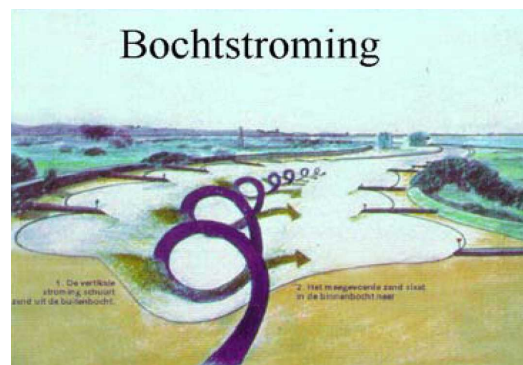
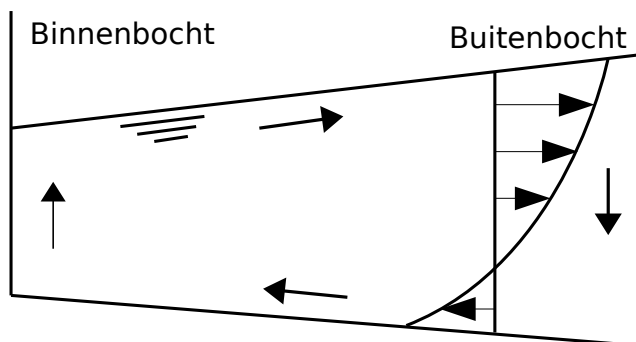
Het hoofdstuk is opgedeeld in twee delen. Het eerste deel beschrijft de processen die optreden wanneer de uiterwaarden niet meestromen (normaal of laagwater). Het tweede deel beschrijft de processen die optreden wanneer de uiterwaarden wel meestromen (hoogwater).

3.1 Processen zonder uiterwaardstroming

In deze paragraaf staan de processen beschreven die optreden bij een afvoer in de rivier waarbij de nevengeul alleen in verbinding staat met de hoofdgeul door de in- en uitstroomopening. Er is dan geen stroming over de uiterwaarden.

Het ontstaan van spiraalstroming in een bocht

In een rivier ontstaat spiraalstroming in een bocht, of beter gezegd: bij gekromde stroomlijnen. Door de traagheid van het water ontstaat er namelijk een dwarsverhang in de waterlijn, zie Afbeelding 5 (links). Hierbij is de waterlijn hoger bij de buitenbocht, en lager in de binnenbocht. Dit dwarsverhang in combinatie met de centrifugaalkracht zorgt voor een secundaire stroming, waarbij water nabij de bodem richting de binnenbocht stroomt, maar water bovenin de waterkolom richting de buitenbocht stroomt. Bij dominant bodem-transport is het water nabij de bodem rijker aan sediment, en stroomt er dus relatief meer sediment richting de binnenbocht. Deze secundaire stroming vormt samen met de primaire stroming de zogeheten spiraalstroming, zie Afbeelding 5 (rechts).



Afbeelding 5: Secundaire stroming (links, naar Van der Mark (2004)) ontstaat door drukverschil over de waterdiepte, veroorzaakt door de resultante van de hydrostatische druk en centrifugaal kracht. De richting van de secundaire stroming is op de bodem naar de binnenbocht. Spiraalstroming (rechts, naar Nuyten, weergegeven in Van der Mark, 2004) is de combinatie van secundaire stroming met primaire stroming.

Wordt de nevengeul benedenstrooms van een binnenbocht aangetakt op de hoofdgeul, dan leidt dit tot een verhoogde sediment-instroom. Bij aantakking van de nevengeul benedenstrooms van een buitenbocht kan een verlaagde sedimentinstroom worden verwacht.

Het Bulle effect

Dit effect zorgt ervoor dat relatief meer sediment (bodemtransport) richting de nevengeul stroomt, dan op grond van de afvoerverdeling verwacht mag worden. Ook dit wordt veroorzaakt door het optreden van secundaire stroming, maar niet door een bocht (het treedt ook op bij een rechte hoofdgeul). De oorzaak zijn gekromde stroomlijnen, die veroorzaakt worden door de debietonttrekking van de nevengeul. Dit zorgt voor verhoogd bodem-transport richting de nevengeul, wat schematisch is weergegeven in Afbeelding 6.

In een ongelijkwaardig aangetakte splitsing, zoals een nevengeul die slechts enkele procenten van de afvoer onttrekt, is het Bulle-effect relatief klein. Een van de parameters die op dit proces effect heeft is de bifurcatiehoek.



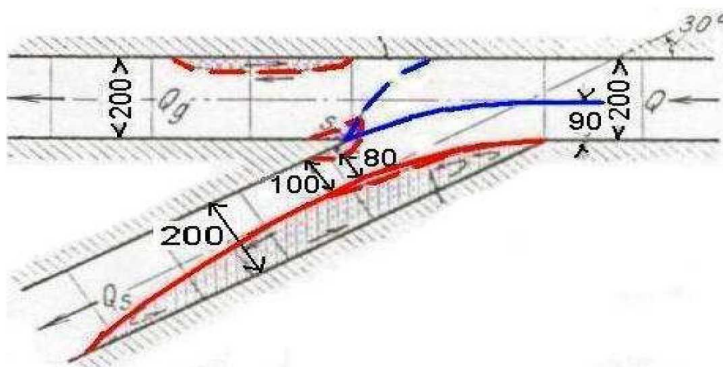
Afbeelding 6: Het Bulle-effect: sedimentrijk water op de bodem stroomt richting de nevengeul, uit Van der Mark (2004)

Bifurcatiehoek

Dit is de hoek tussen de hoofdgeul en nevengeul bij het (bovenstroomse) instroompunt. De grootte van de hoek heeft invloed op het Bulle effect. Hierbij treedt bij een zeer kleine hoek het Bulle-effect nauwelijks op.

Neervorming

Rondom het splitsingspunt kunnen drie neren (draaikolken) ontstaan die de afvoerverdeling kunnen beïnvloeden. Deze ontstaan aan de bovenstroomse oeverkant van de nevengeul, aan de oeverkant van hoofdgeul tegenover de aftakking, en op de splitsingskop die zich afwisselend in hoofd- en nevengeul bevindt, zie Afbeelding 7. De eerste wordt veroorzaakt door de traagheid van het water. Het aanstromende water van de moedergeul heeft namelijk de neiging zijn bestaande weg te vervolgen, waardoor het de stroming aan de bovenstroomse oever van de nevengeul loslaat. De tweede neer, aan de oeverkant van hoofdgeul tegenover de aftakking, ontstaat doordat het water nog steeds afbuigt naar de oever van het splitsingspunt.



Afbeelding 7: Locaties waar neren optreden (in rood), naar Bulle (1926), weergegeven in De Heer (2003)

Een gevolg van neren is dat de stroomvoerende oppervlakte afneemt. Benedenstrooms van de neer neemt dan de snelheid af, wat leidt tot sedimentatie. Tevens slaat sediment neer ter plaatse van de neer.

Het ontstaan van een drempel

Wanneer er meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd dan de transportcapaciteit, zal dit leiden tot sedimentatie aan de bovenstroomse zijde van de nevengeul. Hierdoor ontstaat er een drempel aan het begin van de nevengeul. Deze drempel bemoeilijkt het sediment richting de nevengeul te worden getransporteerd. Dit zorgt ervoor dat er meer sediment richting de hoofdgeul stroomt.

De invloed van bodemvormen

Bodemvormen in de hoofdgeul kunnen de ontwikkeling van een splitsingspunt sterk beïnvloeden. Bodemvormen kunnen namelijk voor een tijdelijke verhoging van de sedimentlast naar een van beide aftakkingen zorgen. Maar gezien het dynamische karakter van bodemvormen is het lastig te voorspellen welke aftakking hierdoor (tijdelijk) meer sediment ontvangt. De uiteindelijke morfologische ontwikkeling van een splitsingspunt is daarmee dus lastig te voorspellen (Kleinhans et al., 2008).

3.2 Processen met uiterwaardstroming

Bij relatief hoge afvoeren stroomt er ook water over de uiterwaarden. Omdat een nevengeul in de uiterwaarden is aangelegd, stroomt het water ook over de nevengeul heen. De nevengeul staat dan ook over de gehele lengte in verbinding met de rivier. Aspecten die dan optreden en de verdeling van afvoer en sediment beïnvloeden, staan hieronder weergegeven.

Uiterwaardstroming dwars/parallel over een nevengeul

Delen van een nevengeul kunnen parallel of dwars op de stroomrichting in de uiterwaard staan, zie Afbeelding 8. Bij stroming parallel over de nevengeul, resulteert de verdieping van de nevengeul in een lagere hydraulische weerstand. Hierdoor wordt de snelheid van het water verhoogd, en dit leidt ertoe dat er meer water naar de nevengeul wordt getrokken. De verhoogde snelheid leidt tot een grotere transportcapaciteit, waardoor dan ook erosie verwacht kan worden. Bij stroming dwars over de nevengeul, resulteert de verdieping van de nevengeul in een verlaging van de snelheid. Hierdoor wordt de transportcapaciteit verlaagd, en werkt de nevengeul als een sedimentvang.

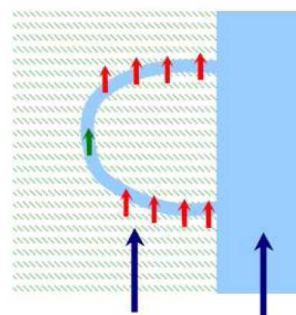
De meest gebruikte parameter om de stroming volgens deze twee principes te schematiseren is de oriëntatiehoek. Dit is de gemiddelde hoek tussen de nevengeul en de hoofdgeul. Een grote oriëntatiehoek geeft dan aan dat de nevengeul behoorlijk dwars op de uiterwaardestroming staat, wat leidt tot verlaging van de transportcapaciteit. Dus zal er relatief meer sedimentatie (of minder erosie) optreden. Een kleine oriëntatiehoek geeft aan dat de nevengeul relatief parallel aan de uiterwaardestroming is aangelegd.

Dus treedt er verhoging van de transportcapaciteit op, wat zorgt voor meer erosie (of minder sedimentatie).

Verder dient opgemerkt te worden dat deze processen voornamelijk invloed hebben op fijn sediment, aangezien het zwaardere materiaal direct sedimenteert wanneer het vanuit de hoofdgeul de uiterwaard instroomt.

Ontstaan van oeverwalafzettingen

Oeverwal afzettingen ontstaan bij hoogwaters door het stroomsnelheidsverschil tussen de hoofdgeul en de uiterwaarden. Wanneer sediment van de hoofdgeul in de uiterwaard zal komen, zal dit door de lage stroomsnelheid direct sedimenteren. Wordt een nevengeul dicht bij een hoofdgeul aangelegd, dan is het mogelijk dat het sediment dat normaal zou worden afgezet als oeverwal in de nevengeul sedimenteert.



- uiterwaardestroming tijdens hogere afvoercondities
- stroming dwars over de nevengeul
- stroming parallel over de nevengeul

Afbeelding 8: Parallelle en dwarse stroming over een nevengeul, uit Klop (2009)

4 Aanleg, beheer en onderhoud

Het ontwerp van een nevengeul bepaalt welke processen, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, dominant zijn. Dit hoofdstuk beschrijft de mogelijkheden van aanleg, beheer en onderhoud, in relatie tot het verwachte morfologische gedrag.

Als eerste zijn de richtlijnen waaraan een nevengeul dient te voldoen beschreven (paragraaf 4.1.1). Om de sedimentinstroom beperkt te houden zijn er ook richtlijnen geschreven voor het sedimentbeheer, vertaald naar relevante parameters voor de aanleg van nevengeulen (paragraaf 4.1.2). Deze ontwerprichtlijnen geven aan welke parameters het morfologische gedrag het meest beïnvloeden.

Uit de richtlijnen blijkt dat nevengeulen worden aangelegd met de neiging tot (lichte) sedimentatie. Mogelijkheden om deze sedimentatie zoveel mogelijk te beperken staan beschreven in paragraaf 4.2.

4.1 Huidige ontwerprichtlijnen

Om te zien wat gevoelige ontwerpparameters van nevengeulen zijn, is eerst in kaart gebracht wat de huidige richtlijnen zijn. Op basis hiervan kan worden bepaald op welke wijze een nevengeul ontworpen moet worden (richtlijnen, paragraaf 4.1.1), en hoe de sedimentinstroom beperkt kan blijven (richtlijnen sedimentbeheer, paragraaf 4.1.2).

4.1.1 Ontwerprichtlijnen

Op basis van vier documenten zijn de richtlijnen voor het ontwerp van een nevengeul op een rij gezet, zie Tabel 1. Deze richtlijnen zijn geformuleerd vanwege scheepvaart, veiligheid en ecologie.

Tabel 1: Richtlijnen voor hoofd- en nevengeul parameters

Parameter	Waarde	Bron
Dwarsstroming hoofdgeul	Max 0,30m/s of 0,15m/s	Rivierkundig beoordelingskader
Sedimentatie nevengeul	Beperkt	Rivierkundig beoordelingskader
Erosie nevengeul	Geen zijdelingse verplaatsing	Rivierkundig beoordelingskader
Stroomsnelheid nevengeul	0,3 m/s tijdens geulvullende condities	Rivierkundig beoordelingskader
Debiet nevengeul	3% van de hoofdgeul tijdens geulvullende condities	Rivierkundig beoordelingskader
Minimum waterdiepte	0,5m tijdens OLR	Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden
Talud in nevengeul	Min 1:10	Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden
Sedimentatie hoofdgeul	Maximaal 20cm	Leidraad Rivieren
Zandvang	Ongewenst	Cyclisch beheer in uiterwaarden

Als toevoeging op de tabel moet gesteld worden dat voor de ecologie beter is dat enkele parameters lokaal variëren over de nevengeul. Dit geldt bijvoorbeeld voor de snelheid, zodat meerdere soorten in hun eigen ideale leefomstandigheid kunnen leven. Deze lokale variaties worden in dit onderzoek echter niet meegenomen, aangezien deze het beeld van het morfologische gedrag over de gehele nevengeul kunnen vertroebelen.

Op basis van de richtlijn voor de stroomsnelheid (0,3m/s) kan al sedimentatie worden verwacht, aangezien deze een stuk lager ligt dan de stroomsnelheid in de hoofdgeul. Dit blijkt dan ook in de praktijk het geval te zijn (Wolters et. al (2001) en Jans et al. (2004)). Mosselman (2001) geeft aan dat voor deze neiging tot sedimentatie bewust is gekozen. Hiervoor bestaan twee redenen:

1. Erosie in de nevengeul zou leiden tot sedimentatie in de hoofdgeul, en daarmee hinder voor scheepvaart

2. Er wordt gevreesd dat tijdens hoogwaters een eroderende nevengeul ongecontroleerd blijft eroderen, wat leidt tot extreme sedimentatie in de hoofdgeul

In het kader van het project Ruimte voor de Rivier worden op diverse plekken nevengeulen aangelegd. Hoewel sedimentatie verwacht mag worden vanwege de ontwerp richtlijnen, dient deze wel zoveel mogelijk beperkt te blijven. Hiertoe hebben Gerritsen & Schropp (2010) het document 'Handreiking sedimentbeheer nevengeulen' geschreven. Hierin staat beschreven dat sedimentatie in één van beide geulen (hoofd- of nevengeul) onontkoombaar is. Ze geven aan dat deze dan het beste in de hoofdgeul kan plaatsvinden vanwege de volgende overwegingen:

- frequent baggerwerk in de nevengeul verstoort de ecologische ontwikkeling
- aanzanding in de hoofdgeul beperkt blijft tot waarschijnlijk 2dm, en dit hoeft niet altijd tot scheepvaartproblemen te leiden
- de hoofdgeul is beter bereikbaar voor baggermaterieel
- baggerwerk in de hoofdgeul kan worden meegenomen in een regulier baggeronderhoudsprogramma

4.1.2 Richtlijnen sedimentbeheer

Het realiseren van de gewenste sedimentverdeling op de bovenstroomse aantakking is echter niet eenvoudig. Hiertoe geeft het 'Handboek sedimentbeheer nevengeulen' kwalitatief aan hoe de sedimentinstroom richting de nevengeul beperkt kan worden:

1. de aantakking van een nevengeul in de buitenbocht van de hoofdgeul
2. een kleine bifurcatiehoek
3. een groot en abrupt verschil in bodemhoogte

Mosselman (2001) voegt hier twee ontwerpparameters aan toe:

4. een maximale lengte verhouding van nevengeul en hoofdgeul van 1,5
5. een oriëntatiehoek van hooguit 45°

Gerritsen & Schropp (2010) geven tevens aan dat de nevengeul ruimer gedimensioneerd dient te worden dan op basis van de ontwerprichtlijnen verplicht is. Hierdoor wordt de onderhoudsfrequentie verlaagd, en kan het onderhoud kosteneffectiever worden uitgevoerd. Met enige voorzichtigheid wordt er door Gerritsen & Schropp (2010) van uitgegaan dat er in de nevengeul een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 1 tot 2 cm/jaar optreedt. Een tweede uitgangspunt is niet vaker te baggeren dan eens in de 5 tot 10 jaar vanuit ecologisch oogpunt. De initieel benodigde overdiepte van de nevengeul wordt dan geschat op 10 tot 20cm.

4.2 Beheers- en onderhoudsmaatregelen

Aangezien nevengeulen volgens de richtlijnen ontworpen worden met de neiging tot (lichte) sedimentatie, kan het nodig zijn om onderhoud te plegen om de nevengeul op de gewenste diepte te houden. Er zijn volgens Klop (2009) drie categorieën maatregelen: sedimentreducerende maatregelen, debietregulerende maatregelen en dwarsprofielcontrolerende maatregelen. Bij de eerste categorie maatregelen wordt ervoor gezorgd dat de instroom van sediment richting de nevengeul wordt beperkt. De tweede categorie maatregelen verhoogt (tijdelijk) het debiet naar de nevengeul. Hierdoor wordt (tijdelijk) de snelheid verhoogd, en spoelt sediment gedeeltelijk de nevengeul uit. Dwarsprofielcontrolerende maatregelen versmallen (tijdelijk) de breedte van de nevengeul, waardoor de snelheid toeneemt. Dit zorgt ervoor dat een gedeelte van het sediment weer de nevengeul uitstroomt.

Het doel van dit onderzoek is echter het beperken van onderhoud door optimalisatie van de aanleg van een nevengeul. Daarom zijn er geen beheers- en onderhoudsmaatregelen gemodelleerd, en een specifieke beschrijving van mogelijke maatregelen is daarom hier achterwege gebleven. Hiervoor wordt verwezen naar Klop (2009), waarin dit uitgebreid beschreven staat.

5 Model beschrijving Delft3D

Dit hoofdstuk beschrijft de werking van Delft3D. Als eerste zijn de gebruikte vergelijkingen voor de 2D-waterbeweging beschreven. Dit wordt opgevolgd door de parameterisatie voor spiraalstroming, en de vergelijking voor het bodem-transport. Daarna is in paragraaf 5.2 beschreven hoe deze vergelijkingen worden opgelost op een 2D-rooster. Vervolgens staat in paragraaf 5.3 hoe er omgegaan wordt met spiraalstroming in het 2D-model. De laatste paragraaf beschrijft de werking van het sedimenttransport. De informatie van dit hoofdstuk is overgenomen uit de FLOW-Manual (2010) van Delft3D en Lesser et al. (2004).

5.1 Waterbeweging

De waterbeweging die gesimuleerd wordt, bestaat uit partiele differentiaal vergelijkingen (paragraaf 5.1.1), en initiële condities en randvoorwaarden (paragraaf 5.1.2).

5.1.1 Vergelijkingen

In de tweedimensionale module van Delft3D worden de ondiepwatervergelijkingen opgelost. Aangezien er gewerkt wordt met de ondiepwatervergelijkingen, is de verticale impulsvergelijking vereenvoudigd tot de hydrostatische drukverdeling:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho gh \quad (1)$$

Waarbij

- P = druk [kg/ms²]
- σ = verticale coördinaat [-]
- ρ = dichtheid van water [kg/m³]
- g = zwaartekracht versnelling [m/s²]
- h = waterdiepte [m]

De continuïteitsvergelijking (2) en de horizontale impulsvergelijkingen (3) en (4) (met weglaten van de Coriolis term) worden beschreven als:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [hu]}{\partial x} + \frac{\partial [hv]}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} P_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + F_x + M_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} P_y - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + F_y + M_y \quad (4)$$

Waarbij

- ζ = waterstand ten opzichte van referentieniveau [m]
- u = diepte-gemiddelde snelheid in x-richting [m/s]
- v = diepte-gemiddelde snelheid in y-richting [m/s]
- t = tijd [s]
- x = coördinaat in de lengterichting [-]
- y = coördinaat in de breedterichting [-]
- ρ_0 = dichtheid van water [kg/m³]
- P_x, P_y = hydrostatische druk in x/y-richting [kg/ms²]
- τ_{bx}, τ_{by} = bodemschuifspanning [kg/ms²]
- F_x, F_y = horizontale Reynolds spanningen [m/s²]
- M_x, M_y = variabelen voor de onttrekking of toevoeging van impuls [m/s²]
- ν_v = kinematische viscositeit [m²/s]

De bodemschuifspanningstermen in vergelijking (3) & (4) kunnen worden omgeschreven met de Chezy-relatie tot vergelijking (5).

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho h} = \frac{gu\sqrt{u^2+v^2}}{C^2 h}; \quad \frac{\tau_{by}}{\rho h} = \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{C^2 h} \quad (5)$$

Waarbij

C = Chezy-coëfficiënt [$\text{m}^{0.5}/\text{s}$]

De Reynolds spanning (F_x , F_y) wordt berekend door gebruik te maken van het eddy viscositeit concept (Lesser, 2004). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de horizontale eddy viscositeit (ν_H). De variabelen M_x en M_y zijn voor de onttrekking of toevoeging van impuls door bijvoorbeeld kunstwerken, en onttrekking of toevoeging van afvoer.

5.1.2 Initiele en randvoorwaarden

Voor het verkrijgen van een goed gesteld probleem, met een unieke oplossing, moet een combinatie van initiele en randvoorwaarden worden gesteld. Als eerste zijn hieronder de randvoorwaarden die opgegeven dienen te worden beschreven, daarna volgen de initiële condities.

Randvoorwaarden

Er bestaan twee typen randen: open en gesloten randen. Open randen zijn water-water scheidingen, waar water door kan stromen. Op deze randen zal de waterstand of het debiet opgelegd moeten worden. Gesloten randen zijn land-water scheidingen, zoals een rivier-oever. Er geldt dat de snelheid dwars op deze scheidingen gelijk is aan nul. Oftewel, water kan niet door een dergelijk rand heen stromen.

De randvoorwaarden voor de impulsvergelijkingen zijn de definities van de bodemschuifspanning. Deze wordt bepaald door:

$$\vec{\tau} = \frac{\rho_o g \vec{u} |\vec{u}|}{C^2} \quad (6)$$

De schuifspanning aan de wateroppervlakte is nul. Deze heeft alleen een waarde wanneer windkracht wordt gesimuleerd, wat binnen dit onderzoek niet het geval is.

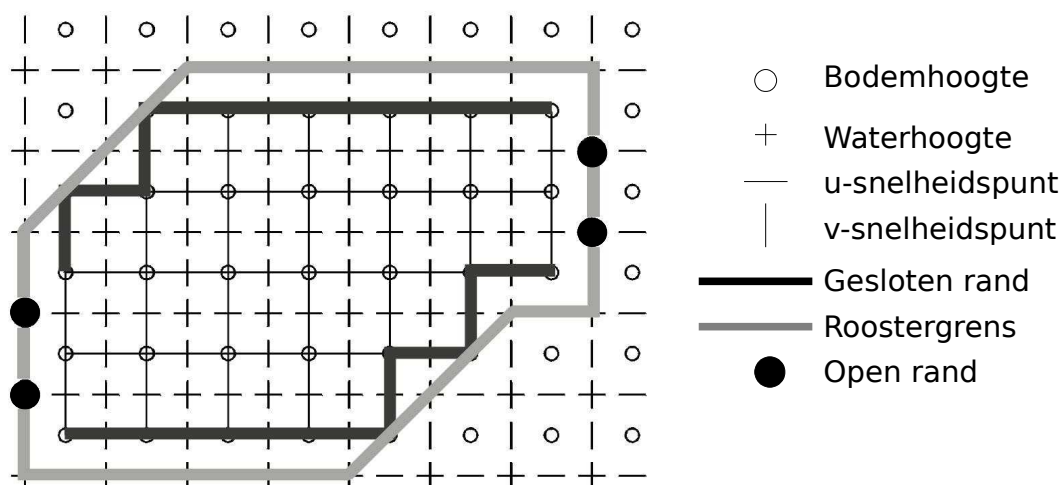
Voor grootschalige simulaties is de schuifspanning langs de gesloten randen gelijk aan nul. Hierbij wordt voor kleinschalig als voorbeeld laboratorium-experimenten gegeven. De loop van een rivier wordt daarom als grootschalig beschouwd, wat betekent dat de schuifspanning langs de gesloten randen verwaarloosd mag worden. Dit wordt ook wel free slip genoemd. Wel is er gepoogd met no slip te werken, waarbij er wel schuifspanning langs de wanden (oeveren) aanwezig. Dit is echter niet gelukt, wat verder beschreven staat in Bijlage III. In de discussie wordt op het effect van deze aanname verder ingegaan.

Initiële condities

Als initiële conditie moet alleen de waterstand in het domein worden opgegeven. Verder is het ook mogelijk om initiële snelheid en initiële spiraalstroming op te geven, maar dit is niet noodzakelijk. In plaats van één uniforme waarde over het gehele domein, kan er ook worden gekozen om te werken met het resultaat van een eerder gedane berekening (d.m.v. een 'restart-file').

5.2 Rooster

Delft3D maakt gebruik van een 'curvi-linear, staggered' rooster. Curvi-linear, ofwel kromlijnig, betekent dat er knikjes in opeenvolgende cellen kunnen voorkomen. Hiermee kan een rooster een bocht op natuurlijke wijze volgen, wat belangrijk is voor morfologische berekeningen (Sloff, 2001). Staggered, geeft aan dat snelheid en impuls op de randen van rekencellen worden berekend, maar andere variabelen (zoals waterhoogte) in het centrum van een rekencel. Dit is verder uitgelegd in Afbeelding 9.



Afbeelding 9: Staggered rooster (naar FLOW-Manual (2010)). Binnen de roostergrenzen zijn de roostercellen weergegeven door de bodemhoogtepunten met elkaar te verbinden. Voor een dergelijke roostercel is goed te zien wat 'staggered' inhoudt: de waterhoogte ligt in het midden van de cel, de snelheid wordt berekend op de randen, en de bodemhoogte in de hoeken.

Voor het oplossen van de ondiepwatervergelijkingen wordt gebruik gemaakt van ADI (Alternating Direction Implicit). Hierbij is iedere tijdstap in gesplitst in twee halve tijdstappen. In de eerste halve tijdstap worden de waterhoogtes en snelheden opgelost in x-richting, en bij de tweede halve tijdstap in y-richting (Welsch, 2002).

5.3 Spiraalstroming

Spiraalstroming ontwikkelt zich door een dwarsverhang in de waterlijn. Dit dwarsverhang zorgt voor een secundaire stroming, wat samen met de primaire stroming voor spiraalstroming zorgt (zie Afbeelding 5). Spiraalstroming treedt op bij gekromde stroomlijnen, zoals in een bocht, maar ook bij het instroompunt van een nevengeul (zie 'het Bulle effect'). Als maat voor de grootte (intensiteit) van de spiraalstroming wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$I = \int |v(\sigma)| d\sigma \quad (7)$$

Aangezien de snelheid over de waterkolom (verticaal) gevonden dient te worden, blijkt dat dit proces 3-dimensionaal is. In de 2D-module van Delft3D kan dit dus niet direct worden meegenomen. Wel is het mogelijk om het effect van spiraalstroming indirect mee te nemen. Hiervoor worden twee extensies gedaan aan de ondiepwatervergelijkingen:

- een extra term in de horizontale impulsvergelijkingen voor de horizontale effectieve schuifspanningen door de spiraalstroming
- een extra advection-diffusie vergelijking voor het ontstaan en het veranderen van de intensiteit van de spiraalstroming

In de impulsvergelijkingen worden aan de rechterkant één term toegevoegd: $+F_{sx}$ en $+F_{sy}$ voor de impulsvergelijking in x- en y-richting respectievelijk. Deze termen zijn te bepalen als:

$$F_{sx} = \frac{1}{h} \left[-2 \frac{\partial \beta h UV}{\partial x} + \frac{\partial \beta h (U^2 + V^2)}{\partial y} \right] \quad (8)$$

$$F_{sy} = \frac{1}{h} \left[2 \frac{\partial \beta h UV}{\partial y} + \frac{\partial \beta h (U^2 + V^2)}{\partial x} \right] \quad (9)$$

Waarbij:

- $\beta = \beta^*(h/R_s)$
- $\beta^* = \beta_c (5\alpha - 15.6\alpha^2 + 37.5\alpha^3)$
- β_c = calibratieparameter

- $\alpha = g^{0.5}/\kappa C < 1/2$
 $\kappa = \text{Von Kármán constante}$
 $R_s^* = \text{effectieve straal van de kromming: } h \frac{|\vec{u}|}{I} > 10h$
 $I = \text{intensiteit van de spirale stroming.}$

De intensiteit van de spirale stroming over tijd en ruimte wordt bepaald door een diepte-gemiddelde advection-diffusie vergelijking:

$$\frac{\partial h I}{\partial t} + \frac{\partial [h U I]}{\partial x} + \frac{\partial [h V I]}{\partial y} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial I}{\partial y} \right) \right] + h S \quad (10)$$

Waarbij:

- $S = -(I - I_e)/T_a$
 $I_e = \text{equilibrium intensiteit van spiraalstroming door centrifugale kracht}$
 $= \frac{h}{R_s} |\vec{u}|$
 $|\vec{u}| = (u^2 + v^2)^{0.5}$
 $T_a = \frac{L_a}{|\vec{u}|}$
 $L_a = \frac{(1 - 2\alpha)h}{2\kappa^2\alpha}$

De straal van de kromming wordt bepaald door:

$$\frac{U_s}{R_s} = -\frac{\partial U_r}{\partial s}$$

Waarbij

- $U_s = \text{stroomsnelheid langs de stromingsrichting}$
 $U_r = \text{stroomsnelheid dwars op de stromingsrichting}$
 $s = \text{coördinaat in de richting van de stroming}$

5.4 Sediment transport

Er zijn drie typen sediment-transport: wash load, suspensief transport, en bodem-transport. Wash load is een type suspensief transport met zeer weinig tot geen interactie met de bodem. Binnen dit onderzoek wordt hier geen rekening mee gehouden. Bij suspensief transport is sediment opgelost over de waterdiepte. Bij bodem-transport, stroomt sediment alleen vlak over de bodem mee. Binnen dit onderzoek wordt alleen gewerkt met bodem-transport, suspensief transport wordt daarom buiten beschouwing gelaten.

Bodem-transport kan worden bepaald met diverse formules. De keuze voor het gebruik van Engelund&Hansen in dit onderzoek is beschreven in de volgende paragraaf. Daarna zijn de correcties voor spiraalstroming en zwaartekracht op deze formule beschreven.

5.4.1 Engelund & Hansen

Een belangrijke keuze is die van een sediment transport formule. Na bestudering van diverse onderzoeken komt naar voren dat voor onderzoeken over de Waal twee sediment transport formules frequent worden gebruikt: Meyer-Peter-Mueller (MPM) en Engelund & Hansen (EH). Hierbij is EH geschikter bij substantieel suspensief transport, terwijl MPM geschikter is bij bodem-transport (Yossef et al. (2008); Sloff en Jagers (2005); de Nooijer (2006)).

Uit voorgaande onderzoeken blijkt dat MPM vooral gebruikt wordt bij 1D (SOBEK) onderzoek, o.a. Van Breen (2002), Ter Hoeven (2002), Hetzer (2005). EH wordt vaker toegepast bij 2D onderzoeken van Delft3D, zoals bij Sloff (2001), Van Reen (2002), Baptist & Mosselman (2002), Hetzer (2005)). Ervaringen van dit onderzoek zijn dat de stroomsnelheden in de nevengeul dicht bij de kritieke stroomsnelheid van MPM ligt voor sediment om in beweging te komen. Kleine stroomsnelheidsverschillen kunnen zo voor grote morfologische veranderingen zorgen. Vooral de sedimentgrootte bleek hierdoor een zeer gevoelige parameter. Er is daarom voor gekozen niet met MPM te werken, maar met

EH. Deze werkt namelijk niet met een kritieke stroomsnelheid, en dergelijke verschillen treden dus niet op. Enkele resultaten met MPM zijn beschreven in Bijlage II.

Wel dient opgemerkt te worden dat de d_{50} in de Waal (2mm) buiten de range van toepasbaarheid van Engelund & Hansen ligt (0,19 - 0,93mm). Er wordt echter toch vastgehouden aan de keuze van deze sediment transport formule, aangezien Sloff (2001) en Hetzer (2005) goede resultaten met deze formule behalen. Ook zij hebben daarbij gebruik gemaakt van een d_{50} buiten deze range (2mm en 1mm respectievelijk).

De grootte van het bodem-transport met Engelund & Hansen wordt gevonden met:

$$S = \frac{0.05 \alpha |\vec{u}|^5}{\sqrt{g} C^3 \Delta^2 D_{50}} \quad (11)$$

Met:

α = calibratieparameter
 Δ = relatieve dichtheid van sediment
 D_{50} = mediane korrelgrootte

De richting van het bodem-transport is gelijk aan de stromingsrichting. Hierop zijn echter twee correcties: enerzijds voor spiraalstroming, anderzijds voor zwaartekrachteffecten.

Spiraalstroming

De richting van het bodem-transport is normaal gesproken in de richting van de diepte-gemiddelde stroming. Door spiraalstroming kan dit echter afwijken. De richting van het bodem-transport wordt dan bepaald door:

$$\tan(\phi_r) = \frac{v - \alpha_l \frac{u}{|\vec{u}|}}{u - \alpha_l \frac{v}{|\vec{u}|}} \quad (12)$$

Waarbij:

$$\alpha_l = \frac{2}{\kappa^2} E_{spir} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{2 \kappa C}\right)$$

met

E_{spir} = calibratie parameter

Espir is dus een parameter waarmee de richting van het bodem-transport aanpast wordt voor spiraalstroming.

Zwaartekrachteffecten

Er zijn twee typen zwaartekrachteffecten: een dwarshelling en een langshelling. In Delft3D wordt eerst het effect van een langshelling verwerkt:

$$\vec{S}'_b = \alpha_s \vec{S}'' \quad (13)$$

Waarbij:

S'' = grootte van het bodem-transport volgens bodem-transport formule [kg/m/s]

S'_b = grootte van het bodem-transport inclusief langshellingseffecten [kg/m/s]

α_s = vermenigvuldigingsfactor voor een langshelling [-]

Deze α_s kan worden bepaald op vier manieren. Binnen dit onderzoek is gekozen voor de methode van Koch & Flokstra, zoals ook gedaan is in een Waal-model dat gekregen is van Deltares.

$$\alpha_s = 1 + \alpha_{bs} \frac{\partial z}{\partial s} \quad (14)$$

Waarbij:

α_{bs} = calibratieparameter

z = bodemhoogte [m]

Het effecten van een dwarshelling is de aanpassing van richting van het bodemtransport. Deze wordt toegepast op het bodem-transport, aangepast voor langshellingseffecten.

$$\tan(\phi_s) = \frac{\sin(\phi_\tau) + \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z_b}{\partial y}}{\cos(\phi_\tau) + \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z_b}{\partial x}} \quad (15)$$

De functie $f(\theta)$ wordt bepaald als:

$$f(\theta) = A_{sh} \theta_i^{B_{sh}} \left(\frac{D_i}{h}\right)^{C_{sh}} \left(\frac{D_i}{D_m}\right)^{D_{sh}} \quad (16)$$

Waarbij:

- $S_{b,n}$ = grootte van het dwarstransport van sediment [kg/m/s]
- α_{bn} = calibratieparameter
- n = coördinaat dwars op de richting van de stroming
- A_{sh} = calibratieparameter
- B_{sh} = calibratieparameter
- C_{sh} = calibratieparameter
- D_{sh} = calibratieparameter
- θ_i = shields parameter
- D_i = diameter van sedimentfractie i [m]
- D_m = gemiddelde sedimentdiameter [m]
- θ_{cr} = kritische Shield parameter

A_{sh} (of A_{shield}) is dus een calibratiefactor, die het effect van een dwarshelling verwerkt in het sediment-transport door de richting van het transport aan te passen.

Morfologische vermenigvuldigingsfactor

Bij het toepassen van een morfologische vermenigvuldigingsfactor wordt de toe- of afname in bodemhoogte na 1 tijdstap vermenigvuldigd met de vermenigvuldigingsfactor. Hierdoor wordt de simulatietijd verkort. Het is mogelijk om dit toe te passen, aangezien de morfologische veranderingen op veel grotere tijdschaal plaatsvinden dan de veranderingen in de waterbeweging. Deze factor kan volgens de FLOW-Manual (2010) oplopen tot boven 1000. Binnen dit onderzoek is het effect van deze factor onderzocht, wat beschreven staat in paragraaf 6.3.

6 Basisvariant

Om het effect van individuele parameters in kaart te brengen is als eerste een basisvariant ontworpen. Resultaten van individuele parameters kunnen met deze basisvariant worden vergeleken.

In dit hoofdstuk is als eerste de invoer in het Delft3D-model beschreven. Daarna is getest of dit rooster voldoet, en hoe groot de morfologische factor kan worden. Daarna volgen de morfologische resultaten voor de hoofdgeul, en tot slot volgen de resultaten van de nevengeul.

6.1 Invoer

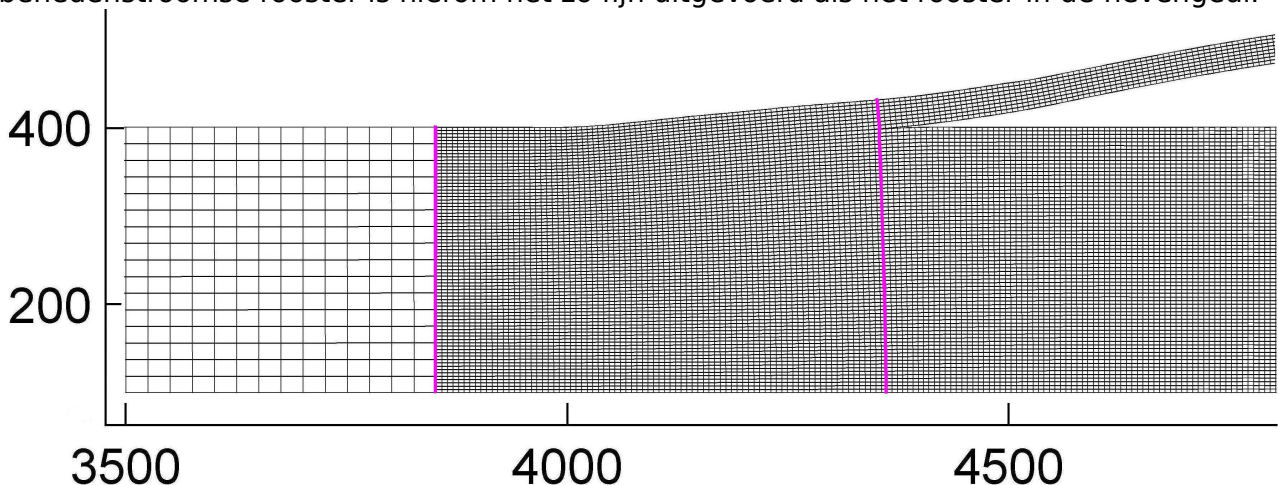
In deze paragraaf wordt de gebruikte invoer in het Delft3D-model weergegeven. Als eerste is hier het gebruikte rooster weergegeven (Afbeelding 10).



Afbeelding 10: Rooster basisvariant. Lengte hoofdgeul is 10km, lengte nevengeul 1,5km. Stroomrichting is van links naar rechts.

Het rooster is 10km lang, waarbij de hoofdgeul ter plaatse van de nevengeul 1,5km lang is, en is gepositioneerd tussen 4,25km tot 5,75km. Het breedste stuk uiterwaard tussen hoofdgeul en nevengeul is 100m. In dit rooster stroomt water en sediment van links naar rechts.

Het rooster is gemaakt met domein-decompositie (DD), wat inhoudt dat het rooster in verschillende deelroosters is opgesplitst (Afbeelding 11). Dit heeft twee voordelen. Ten eerste kan hierdoor een vloeiende splitsing (in- en uitstroomopening) gemaakt worden, zonder dat er twee rijen cellen moeten eindigen. Het tweede voordeel is dat roosters op redelijke afstand van de nevengeul minder fijn hoeven te zijn, wat rekentijd scheelt. In principe geldt dit zowel bovenstrooms als benedenstrooms, alleen is gebleken dat dit bij het benedenstroomse rooster niet goed werkt. Dit is verder uitgelegd in bijlage III. Het benedenstroomse rooster is hierom net zo fijn uitgevoerd als het rooster in de nevengeul.



Afbeelding 11: Basisrooster rondom de instroomopening. De paarse lijnen zijn de grenzen van de verschillende domeinen die door middel van domein-decompositie aan elkaar zijn gekoppeld.

In deze afbeelding is links het bovenstroomse rooster weergegeven. Van dit rooster is 1 cel gelijk is aan 5x5 cellen van andere roosters. Alles benedenstrooms van dit rooster heeft dezelfde grootte, dus ook het gedeelte dat hier niet is weergegeven. Het aantal cellen in breedte van de nevengeul is 8.

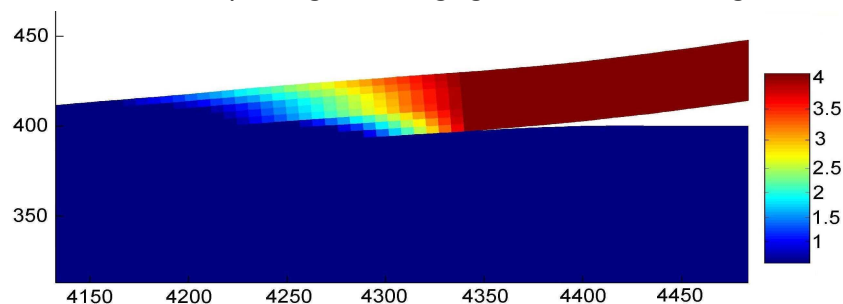
In de tabel hieronder staan de gebruikte waardes voor diverse parameters binnen Delft3D.

Tabel 2: Invoerwaarden voor parameters

Parameter	Waarde	Motivatie
i	0.0001	verhang Waal
Chezy	45 m ^{0.5} /s	weerstand Waal
Breedte	Hoofdgeul 300m, nevengeul 30m	breedte Waal
Q-bovenstrooms	2000m ³ /s (stationair)	Constante afvoer Waal
h-benedenstrooms	6,032m	Evenwichtswaterdiepte o.b.v Q,B,C en i
Initiële condities	Restart-file van alleen hydraulische berekening	Hydraulica in evenwicht
D10; D50; D90	0,4mm; 2,5mm; 12mm	Julien et al. (2002); waarde Waal
Mor-factor	2920	Paragraaf 6.3
Morfologische randvoorwaarde (q _s)	0,00004262 m ³ /s/m	Geen bodemverandering voor situatie met alleen hoofdgeul (dus zonder nevengeul)
Sediment-transport-formule	Engelund&Hansen	Paragraaf 5.4; Bijlage II
Ashield	0,7	Gebruikelijke waarde
Espir	1	Gebruikelijke waarde
Wandslipvoorwaarde	Free slip	Bijlage III
Eddy viscositeit	1	Gebruikelijke waarde
Eddy diffusiteit	1	Gebruikelijke waarde

De waterstand benedenstrooms is gelijk aan de evenwichtswaterdiepte van de hoofdgeul. In een simulatie waarbij alleen de hoofdgeul hydraulisch is doorgerekend, wordt dan ook in het gehele domein deze waterdiepte gevonden. De morfologische randvoorwaarde is zo gekozen dat er in een situatie zonder nevengeul, geen sedimentatie of erosie plaatsvindt in de hoofdgeul. Dit is namelijk de hoeveelheid sediment die normaal (dus zonder nevengeul) in de rivier wordt vervoerd. Deze hoeveelheid blijft (ver) bovenstrooms aangevoerd worden, en is daarom ook als randvoorwaarde gebruikt. Voor enkele parameters is gekozen voor de gebruikelijke waarde, zoals deze ook worden gebruikt in een Waal-model dat van Deltares is gekregen. De gevoeligheid van enkele van deze parameters is in getest in het volgende hoofdstuk.

Het dwarsprofiel van de hoofd- en nevengeul is een bakvorm, wat wordt besproken in hoofdstuk 9. De nevengeul is ten opzichte van de hoofdgeul 3.5m verhoogd aangelegd, om zodoende een debiet van 3% van de hoofdgeul te creëren in de nevengeul. De bodemligging van de instroomopening is weergegeven in Afbeelding 12.



Afbeelding 12: Initiële bodemligging van de instroomopening van de nevengeul. De bodem van de nevengeul is 3,5m hoger dan de bodem van de hoofdgeul, met een vloeiende overgang. Zodoende wordt het debiet op 60m³/s gebracht, wat 3% is van het debiet in de hoofdgeul.

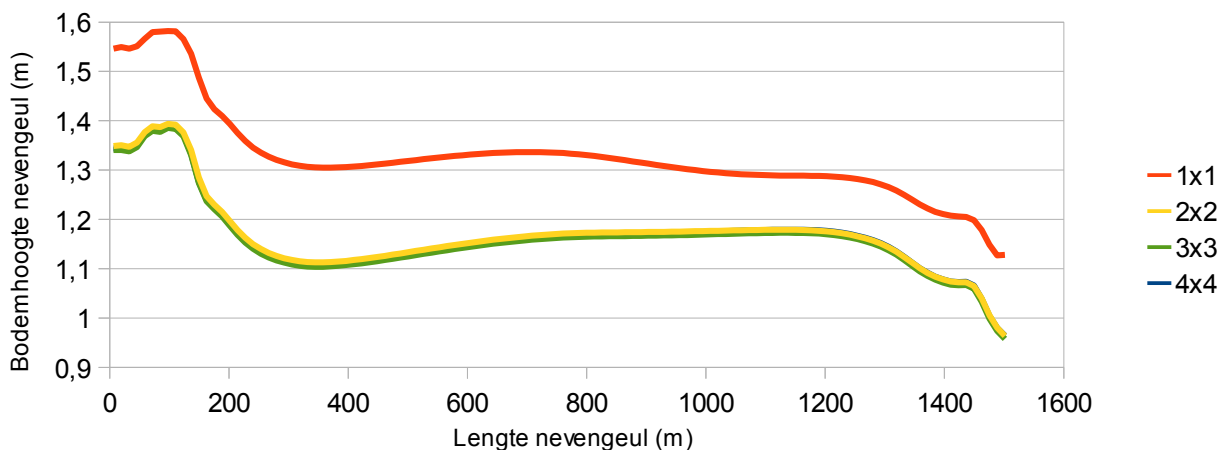
6.2 Convergentietest

Uit analyse van de eerste test-resultaten, is gebleken dat het rooster zelf invloed heeft op het morfologische gedrag. Er zijn daarom diverse roosters ontworpen die poogden te voorkomen dat het rooster zelf invloed heeft. Dit is verder beschreven in Bijlage III. Uiteindelijk bleek dat het gekozen rooster te grof was, en is er een convergentietest uitgevoerd door het verfijnen van het oorspronkelijke rooster. Er is aangenomen dat er betrouwbare resultaten zijn verkregen, wanneer de resultaten van fijnere roosters geen verschillende resultaten meer opleveren.

Er zijn vier roosters getest. Het rooster weergegeven in Afbeelding 11 is een 2x2 verfijning van het grofste rooster hier getest. Dit grofste rooster is ook 3x3 en 4x4 verfijnd.

Bij het uitvoeren van de convergentie-test waren de waarden van enkele parameters anders dan in Tabel 2. Zo was bijvoorbeeld de morfologische factor nog niet getest, en op een relatief lage waarde van 730 gehouden. Tevens was de bodem van de nevengeul op gelijke hoogte aangelegd als de hoofdgeul, aangezien dit veel eenvoudiger te construeren is. De gesimuleerde tijd voor de convergentie-test is 2 jaar, zodat de rekentijd (zeker voor de fijne roosters) beperkt is gebleven.

De breedte-gemiddelde verschillen van het morfologische gedrag in de nevengeul is weergegeven in Afbeelding 13. Er is voor gekozen om de nevengeul weer te geven, aangezien de morfologische reactie hier sterker is dan in de hoofdgeul (omdat deze laatste breder is).



Afbeelding 13: Breedte-gemiddelde bodemligging in de nevengeul na 2 jaar morfologisch doorrekenen. De bodemhoogtes zijn nog niet in evenwicht.

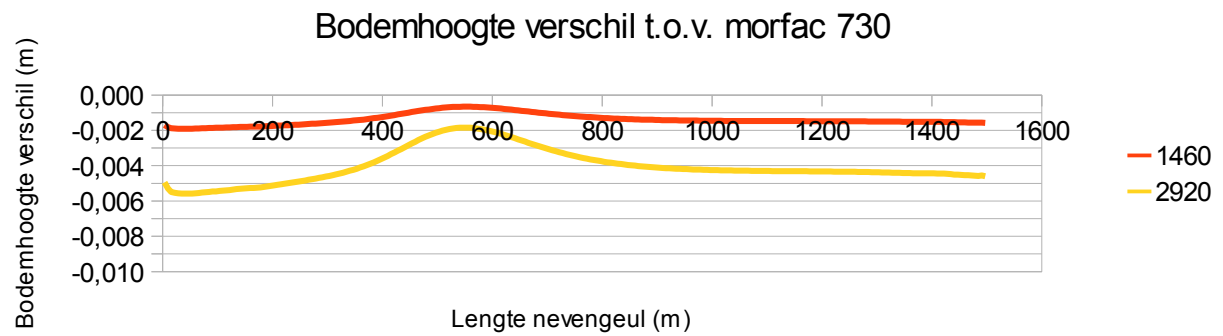
Deze afbeelding laat zien dat alleen het '1x1'-rooster afwijkt. Elke verdere verfijning geeft breedte-gemiddeld nagenoeg hetzelfde resultaat. Ten opzichte van het 4x4 rooster treedt er voor rooster 1x1, 2x2 en 3x3 respectievelijk gemiddeld 160mm sedimentatie, 3mm sedimentatie en 5mm erosie op.

Het is echter ook interessant om te weten of dit alleen geldt voor de breedte-gemiddelde resultaten, of ook voor de 2D-resultaten. In bijlage IV is te zien dat ook de 2D-resultaten gelijk zijn voor rooster 2x2, 3x3 en 4x4, en dat alleen rooster 1x1 wijkt af.

Op basis van deze resultaten is geconcludeerd dat verder verfijning dan 2x2 niet nodig is, en dat de 2x2 verfijning betrouwbare resultaten genereert. Dit is dan ook gekozen als basisvariant.

6.3 Morfologische factor

Voor de convergentie-test is gebruik gemaakt van een morfologische factor van 730. Deze factor is steeds verdubbeld, om te testen of er ook gewerkt kan worden met een grotere factor, waardoor de rekentijd afneemt. Het blijkt dat na drie keer verdubbelen de simulaties vastlopen, dus 5840 is een te grote morfologische factor. De resultaten van de geteste factoren zijn weergegeven in Afbeelding 14.



Afbeelding 14: Verschil in de breedte-gemiddelde bodemligging tussen de morfologische factor 1460 en 2920 ten opzichte van 730, na 2 morfologische jaren.

De verschillen tussen de morfologische factoren zijn zeer klein (maximaal 5mm). Er wordt daarom van uitgegaan dat kleinere morfologische factoren eenzelfde resultaat opleveren, en er daarom gewerkt kan worden met de grootste morfologische factor (2920).

6.4 Resultaat hoofdgeul

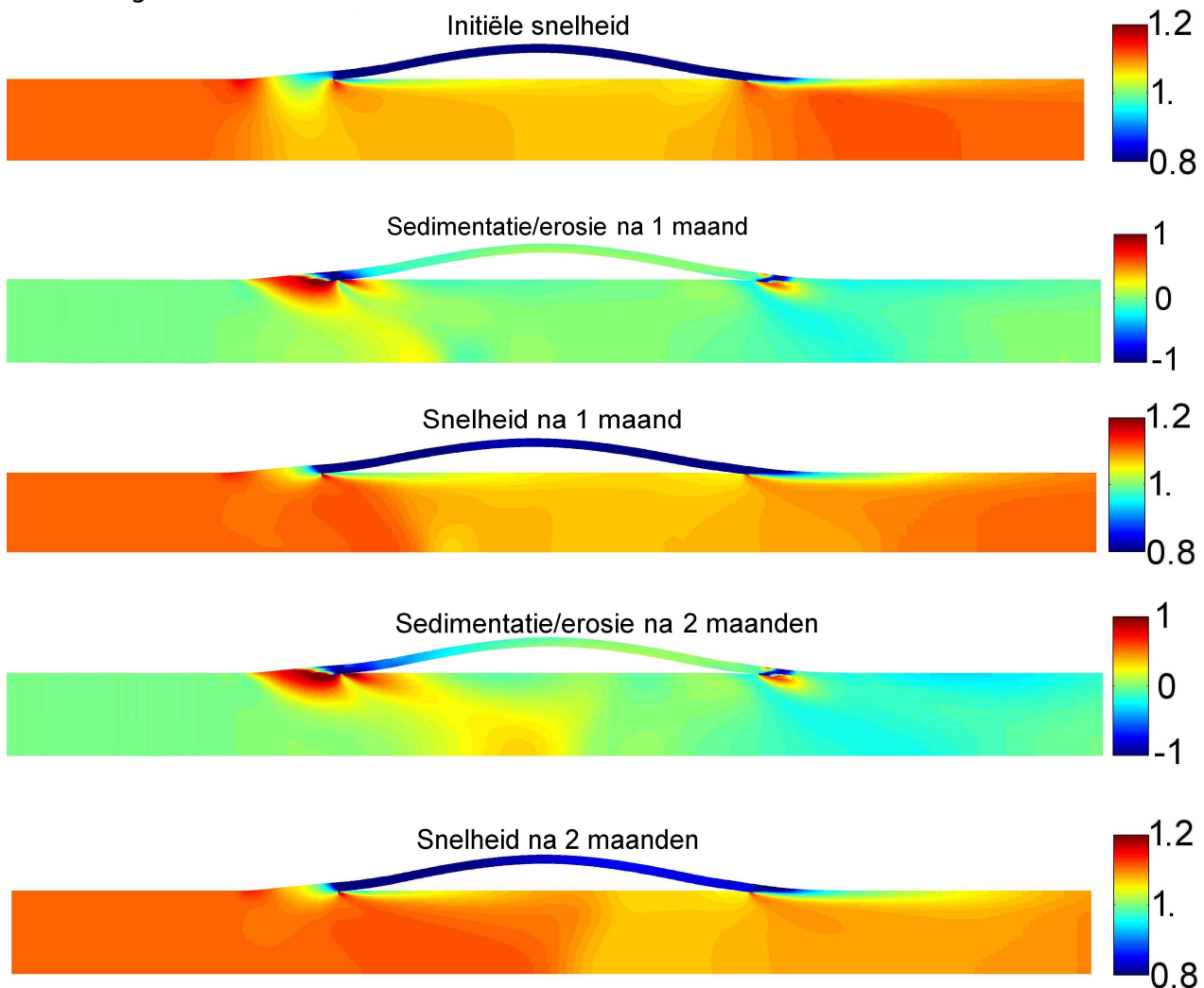
Het resulterende morfologische gedrag van de hoofdgeul voor de basisvariant is in deze paragraaf beschreven. Dit is voor zowel de korte als de lange termijn in kaart gebracht.

6.4.1 Korte termijn

In deze paragraaf is het morfologische gedrag op de korte termijn beschreven. Allereerst is het 2-dimensionale stroombeeld en morfologisch gedrag voor de eerste 2 maanden weergegeven. Daarna zijn de resultaten voor de eerste jaren breedte-gemiddeld beschreven.

2-Dimensionale gedrag

Deze paragraaf laat het verband zien tussen het stroombeeld en het morfologische gedrag. Hiervoor zijn de stroombeelden na 0, 1 en 2 maanden weergegeven, en de opgetreden sedimentatie/erosie na 1 en 2 maanden. Hierbij is alleen gekeken naar de hoofdgeul, de nevengeul is namelijk in paragraaf 6.5 beschreven. In sommige gevallen is de schaal daarom zo gekozen dat het de waarden in de hoofdgeul goed in kaart brengt, en valt de waarde in de nevengeul buiten deze schaal. Let dus vooral niet op de waarden in de nevengeul.



Afbeelding 15: Stroombeelden en morfologische reactie voor de hoofdgeul voor de eerste 2 maanden.
Goed te zien is dat sedimentatie optreedt op ter plaatse van snelheidsverlaging, en erosie op ter plaatse van snelheidsverhoging.

De bovenste figuur van Afbeelding 15 laat zien dat de debietonttrekking van de nevengeul leidt tot een verlaging van de stroomsnelheid in de hoofdgeul. Duidelijk te zien is dat dit

na één maand tot sedimentatie leidt bij de snelheidsverlaging (rondom de instroomopening), en tot erosie bij de snelheidsverhoging (rondom de uitstroomopening). Dit zorgt voor een verandering in het stroombeeld, waarbij het gebied van snelheidsverlaging benedenstrooms verplaatst. Dit gedrag, van sedimentatie en erosie bij respectievelijk snelheidsverhoging en snelheidsverlaging, herhaalt zich in de tweede maand. Feitelijk verplaatst hierdoor het gebied van snelheidsverlaging steeds verder benedenstrooms.

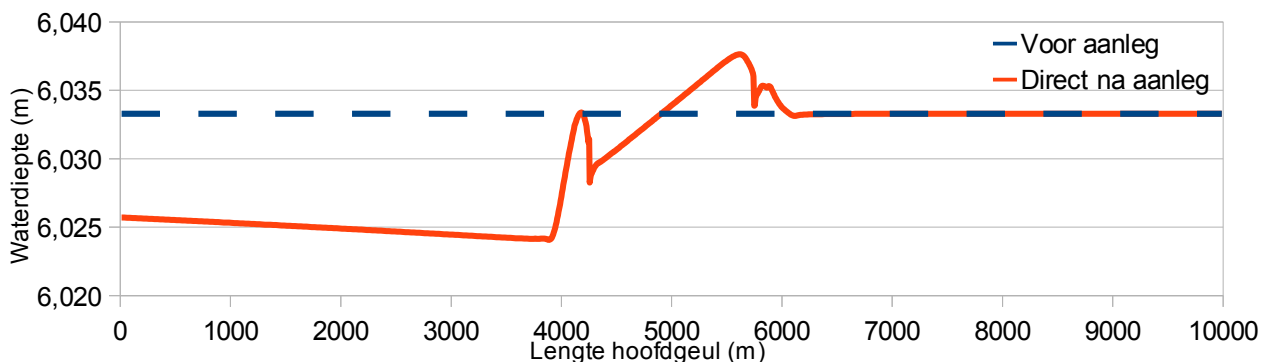
Bij de instroomopening ontstaat een halve cirkel van sedimentatie. Opvallend is dat over een smalle strook binnen deze cirkel geen sedimentatie optreedt. Dit is exact na de splitsing, waar debiet de hoofdgeul in wordt gestuurd door gebrek aan afvoercapaciteit in de nevengeul. In bijlage V zijn detail-opnames van de instroomopening in de tijd weergegeven, zowel van snelheidsvectoren als de bodemhoogte.

Breedte-gemiddelde patroon

Voor een goede vergelijking met analytisch en 1D onderzoek, zijn de 2D resultaten teruggebracht naar breedte-gemiddelde resultaten. Dit is zowel voor hydraulica als morfologie gedaan.

Hydraulica

Als eerste is de breedte-gemiddelde waterdiepte in de hoofdgeul weergegeven (Afbeelding 16). Hierin is te zien wat het verschil in waterdiepte is voor en (direct) na aanleg van de nevengeul.



Afbeelding 16: Breedte-gemiddelde waterdiepte voor en direct na de aanleg van de nevengeul. Direct na aanleg is er bovenstrooms een waterstandsverlaging van (maximaal) 9,2mm.

In de initiële situatie, wanneer er geen nevengeul ligt, is de waterstand over het gehele domein gelijk. Dit is dus de evenwichtswaterdiepte. Opvallend is wel dat deze 1,25mm hoger ligt dan de analytisch berekende waarde, ondanks dat deze waarde ook als benedenstroomse randvoorwaarde is opgegeven. Dit kan komen door een kleine afwijking in de berekening zijn, maar ook een weergave probleem van het staggered rooster. Dat is binnen dit onderzoek niet duidelijk geworden.

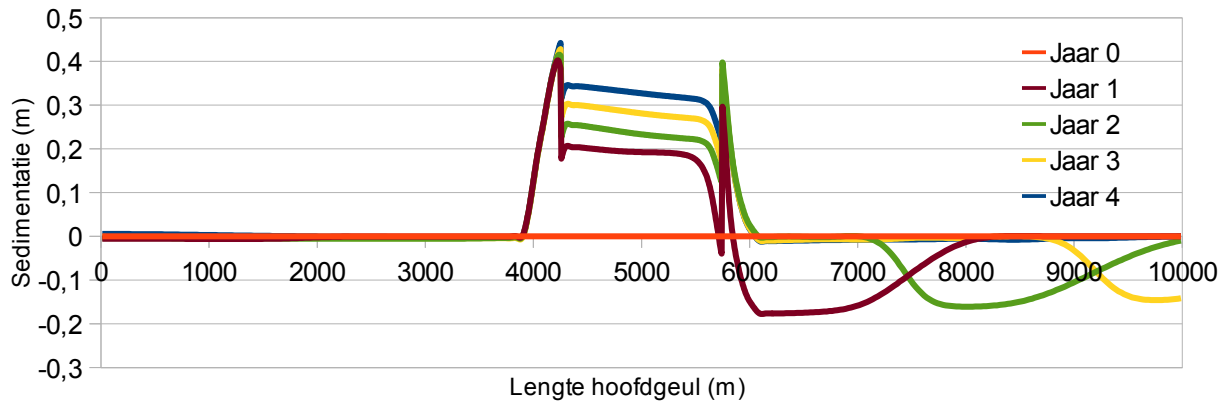
Direct na aanleg van de nevengeul verandert de waterdiepte in de hoofdgeul, welke in drie secties te onderscheiden zijn. Benedenstrooms van de nevengeul treedt er geen verschil in waterstand op na aanleg van de nevengeul. In het gedeelte van de hoofdgeul ter hoogte van de nevengeul (4,25km-5,75km) treedt zowel opstuwing als waterstandsverlaging op. De opstuwing komt door uitstroomeffecten. De waterstandsverlaging komt door de debietsonttrekking van de nevengeul. Hierdoor beweegt de waterstand richting de evenwichtswaterdiepte (5,91m), maar de lengte van de maatregel is te kort om deze waterdiepte te bereiken. Bovenstrooms van de nevengeul is de waterstandsverlaging maximaal (9,2mm), en verkleint het waterstandsverschil zich bovenstrooms. Dit komt door de evenwichtswaterdiepte die op dit gedeelte gelijk is als benedenstrooms van de nevengeul.

De maximale waterstandsverlaging wordt dus direct bovenstrooms gerealiseerd, en bedraagt 9,2mm. Dit lijkt weinig, maar hierbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat er gerekend wordt met een constante afvoer van 2000m³/s, terwijl de meeste

hydraulische onderzoeken rekenen met de maatgevende afvoer. Ook is de lengte van de nevengeul niet zo groot, waardoor de waterstandsdeling beperkt blijft.

Morfologie

Ook het morfologische gedrag in de hoofdgeul is terug gebracht naar een één-dimensionaal patroon. Hiervoor is de opgetreden sedimentatie/erosie (voor de eerste vier jaar) gemiddeld over de breedte (Afbeelding 20).



Afbeelding 17: Breedte-gemiddelde sedimentatie voor de eerste 4 jaar na aanleg van de nevengeul.

Net als bij de breedte-gemiddelde waterdiepte kan ook de breedte-gemiddelde sedimentatie in drie trajecten worden onderverdeeld. Benedenstrooms van de nevengeul ontstaat in eerste instantie een erosiekuil van 18cm. Deze kuil migreert naar benedenstrooms, en is na 4 jaar het domein uitgestroomd. De bodemligging die dan ontstaat is gelijk aan de oorspronkelijke bodemligging. Bovenstrooms van de nevengeul ontstaat de eerste 3 jaar 5mm erosie. Dit komt omdat de waterstandsverlaging een snelheidstoename veroorzaakt.

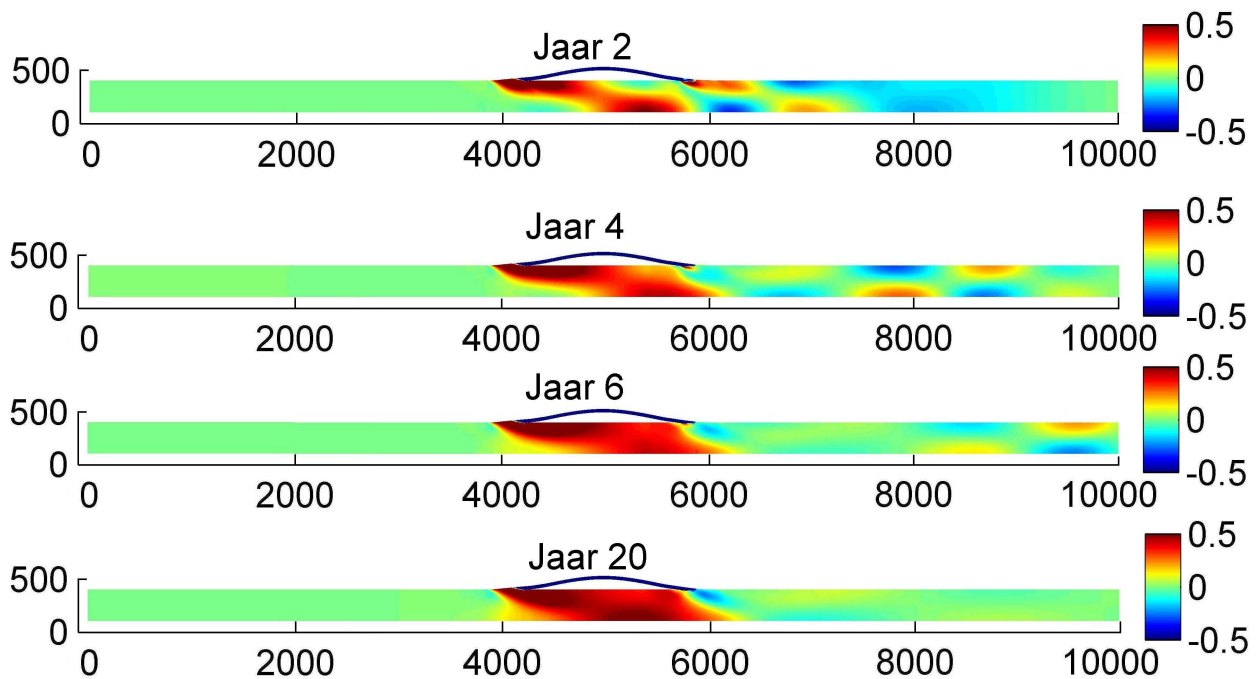
De grootste morfologische verandering treedt echter op in het middengedeelte (4250-5750m, waar de nevengeul ligt). Afbeelding 17 laat zien dat hier sterke sedimentatie optreedt. Deze sedimentatie is groter dan 20cm, en hangt samen met de erosie in de nevengeul. Dit (ongewenste) gedrag is verder beschreven in paragraaf 6.5. Daarnaast is te zien dat in dit gedeelte het bodemverhang toeneemt.

6.4.2 Lange termijn

Hiervoor is de morfologische ontwikkeling op korte termijn in kaart gebracht. In dit gedeelte wordt ingegaan op het gedrag op lange termijn. In deze paragraaf zijn de resultaten van de hoofdgeul op de lange termijn beschreven. Dit is zowel 2-dimensionaal, als breedte-gemiddeld weergegeven.

2-dimensionale gedrag

Bij het analyseren van het 2-dimensionale morfologische gedrag op de lange termijn valt op dat er alternerende banken ontstaan. Deze ontstaan benedenstrooms van de nevengeul, en migreren de eerste jaren naar benedenstrooms. Na verloop van tijd ontstaan dan vaste banken. Dit proces is weergegeven in Afbeelding 18.



Afbeelding 18: Verandering in bodemhoogte in de hoofdgeul. Hierin is goed het ontstaan van alternierende banken (jaar 2&4) te zien, welke naar benedenstrooms migreren. Daarna ontstaan vaste banken (jaar 6) die niet van plaats veranderen (jaar 20). Tevens is de erosiekuil waar te nemen in Jaar 2, tussen 7800-8800m, zoals ook in Afbeelding 17 weergegeven.

Benedenstrooms van de nevengeul ontstaan in de eerste jaren alternierende banken in de hoofdgeul. Deze hebben een maximale hoogte van 25cm, en migreren naar benedenstrooms. Na 6 jaar zijn de alternierende banken uit het domein gestroomd, waarbij 4,25km is afgelegd. De alternierende banken worden opgevolgd door vaste banken, welke een hoogte hebben van 10cm.

Dit patroon wordt ook beschreven in Kleinhans et al. (2008). In hun onderzoek naar splitsingen met een bovenstroomse bocht, wordt gestart met een initieel vlakke bodem. Ze beschrijven dat in de eerste jaren alternierende banken ontstaan in de benedenstroomse geulen, die zich naar benedenstrooms verplaatsen. Daarna ontstaat een systeem van verhogingen/verlagingen aan de oevers die zich fixeren qua positie. Dit gedrag is dus identiek aan het gedrag dat ontstaat bij een nevengeul.

Voor het ontstaan van alternierende banken is ten minste een breedte-diepte verhouding van 20 noodzakelijk (Schielen et al., 1993). Bij deze simulatie is de breedte-diepte verhouding in de hoofdgeul 50, een stuk hoger dan het minimum. Het ontstaan van alternierende banken door de 'verstoring' van de nevengeul kan dan ook verwacht worden.

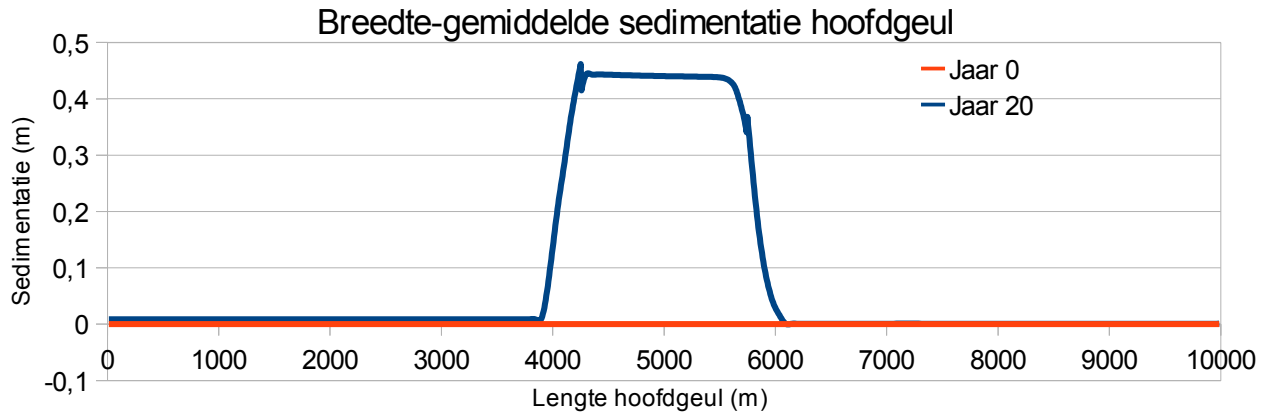
Een andere constatering op basis van Afbeelding 18, is dat bovenstrooms van de nevengeul geen sedimentatie of erosie lijkt plaats te vinden. Het blijkt echter dat hier uiteindelijk lichte sedimentatie (8,7mm) ontstaat in jaar 20, zoals hierna in het breedte-gemiddelde patroon duidelijker wordt. Door de gekozen schaal is dit echter niet waar te nemen. Rondom de instroomopening verwijdt de hoofdgeul zich, waardoor de snelheid daar lokaal afneemt. Hierdoor verlaagt de transportcapaciteit, en vindt er sedimentatie plaats. Door de debiet-onttrekking van de nevengeul ontstaat er een snelheidsverlaging in de hoofdgeul ter plaatse van de nevengeul. Dit leidt tot sedimentatie in dit gedeelte van hoofdgeul.

Breedte-gemiddelde patroon

Ook de resultaten van de lange termijn zijn teruggebracht naar breedte-gemiddelde resultaten. Dit is zowel voor de morfologie als hydraulica uitgevoerd.

Morfologie

Het morfologische resultaat na 15 jaar is gelijk aan dat na 20 jaar. Daaruit kan dus geconcludeerd worden dat het systeem van hoofd- en nevengeul na 15 jaar in evenwicht is. De verandering in bodemligging is weergegeven in Afbeelding 19.



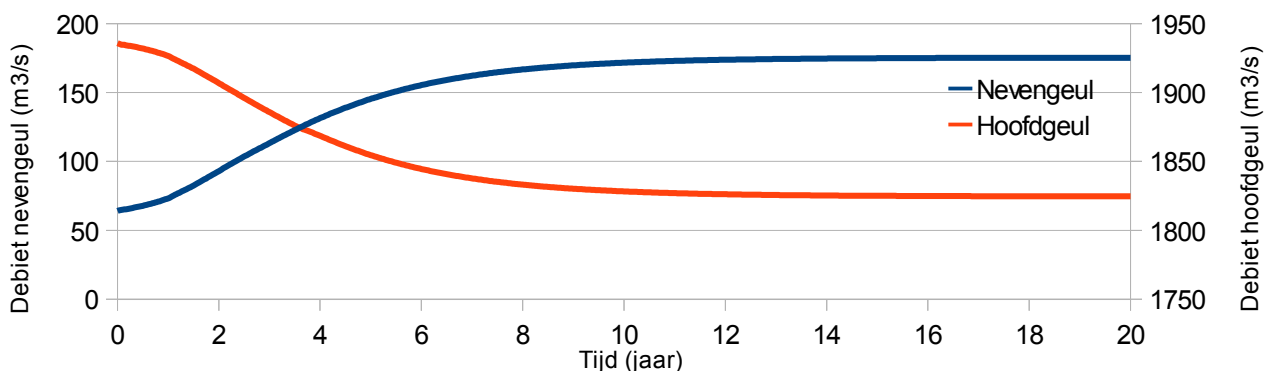
Afbeelding 19: Sedimentatie in de hoofdgeul. Bovenstrooms sedimentatie van 8,7mm. In het middengedeelte een sedimentatie van 44cm. Benedenstrooms treedt geen sedimentatie of erosie op.

Het morfologische gedrag in de hoofdgeul is op te splitsen in drie secties: bovenstrooms, ter plaatse van de nevengeul, en benedenstrooms.

Benedenstrooms is de uiteindelijke bodemligging gelijk aan de initiële bodemligging. De erosiekuil die hier in de eerste jaren na aanleg doorheen trekt, is dus niet van invloed op de uiteindelijke bodemhoogte.

Bovenstrooms treedt lichte sedimentatie op van 8,7mm. Dit lijkt weinig, maar is van dezelfde orde grootte als de initiële waterstandsverlaging die door de nevengeul werd gerealiseerd. In de hierna volgende paragraaf 'Hydraulica' is dit verder uitgediept.

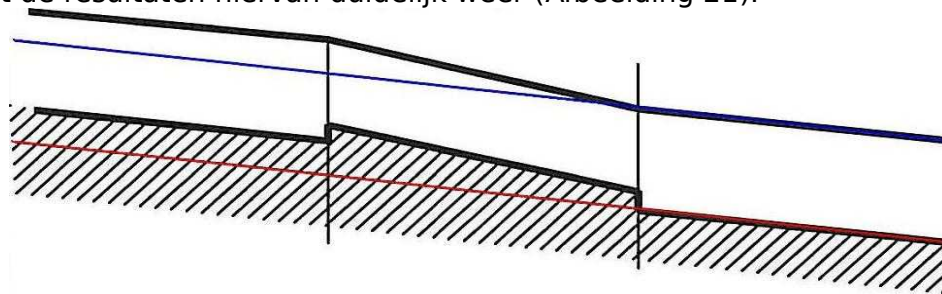
De grootste verandering treedt op ter plaatse van de nevengeul, waar de hoofdgeul 44cm sedimenteert. Tevens vergroot het bodemverhang hier met 5% ten opzichte van het initiële verhang. De sedimentatie van 44cm is groter dan de richtlijn van 20cm, en hangt samen met de erosie in de nevengeul. Hierdoor wordt meer debiet van de hoofdgeul onttrokken dan de richtlijn van 3%. De toename van debiet in de tijd is weergegeven in Afbeelding 20.



Afbeelding 20: Afvoer door hoofd- en nevengeul in de tijd.

Deze grafiek laat zien dat de toename in debiet in de nevengeul $110\text{m}^3/\text{s}$ is. Na 20 jaar is het percentage dat de nevengeul onttrekt aan de hoofdgeul toegenomen van 3% tot 9,6%.

Op basis van analytische evenwichtsmorfologie kan ook bepaald worden wat de uiteindelijke bodemligging in de hoofdgeul is. Een illustratie uit het dictaat van Ribberink (2006) geeft de resultaten hiervan duidelijk weer (Afbeelding 21).



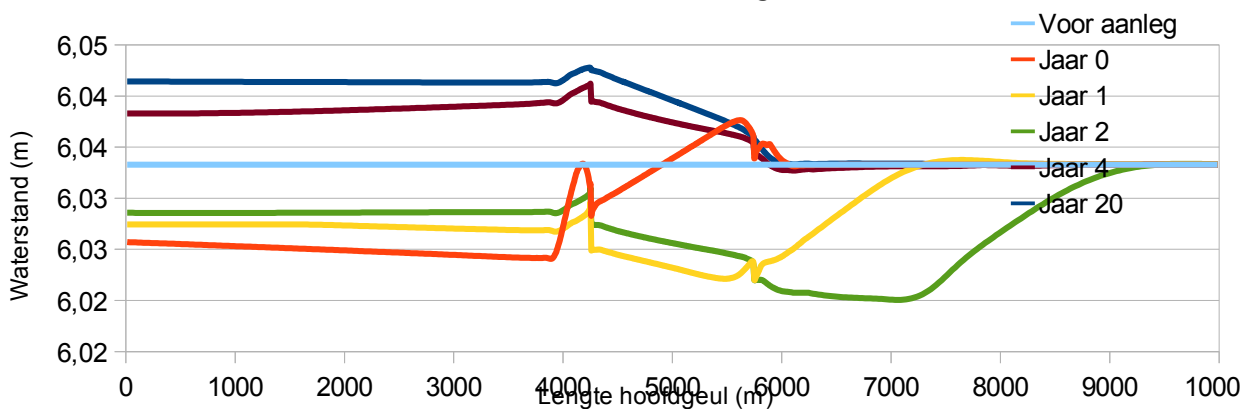
Afbeelding 21: Evenwichtssituatie in de hoofdgeul na aanleg van een nevengeul (ter plaatse van de middensectie), naar Ribberink (2006). In rood de initiële bodemligging en in blauw de initiële waterstand voor aanleg van de nevengeul.

In Afbeelding 21 zijn duidelijk 3 trajecten te onderscheiden. Benedenstrooms is in de evenwichtssituatie niets veranderd, noch voor de waterstand, noch voor de bodemligging. In het middengedeelte is door de debietonttrekking een lagere evenwichtsdiepte en een groter verhang. Bovenstrooms is het verhang en de waterdiepte gelijk aan de initiële situatie, alleen door sedimentatie ligt zowel de bodemhoogte als de waterstand hoger dan initieel. Dezelfde karakteristieken zijn ook te zien bij de simulatie in Delft3D, zie Afbeelding 19 (bodempligging) en 22 (waterstand). Dat betekent dat kwalitatief de reactie voor een analytische studie gelijk is aan 2D resultaten.

Hoewel de kwalitatieve reactie voor de analytische en 2D resultaten gelijk is, zijn er kwantitatief wel enige verschillen. Zo is de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul ter plaatse van de nevengeul analytisch gezien 5,49m, in plaats van de 5,57m zoals berekend. Dat er in 2D 8cm minder sedimentatie optreedt in de hoofdgeul, komt omdat er ook sediment wordt onttrokken door de nevengeul. Hier wordt bij analytische studie geen rekening mee gehouden. Wordt er gekeken naar de sedimentatie bovenstrooms van de nevengeul, dan blijkt dit volgens analytische studie 1,4cm te sedimenteren. Dit is een stuk meer dan het resultaat in 2D (0,9cm), en ligt aan het verschil in verhang in het gedeelte ter plaatse van de nevengeul. Analytisch wordt er een toename van 10% in verhang voorspeld, terwijl in 2D slechts een toename van 5% wordt waargenomen. Hieruit blijkt dat analytische reactie sterker is dan de 2D-resultaten. Dit wordt veroorzaakt doordat de nevengeul in analytische studies alleen debiet onttrekt, terwijl bij numerieke studies ook sediment wordt onttrokken.

Hydraulica

Morfologie en hydraulica beïnvloeden elkaar. Uit de vorige paragraaf is gebleken dat de morfologie na 15 jaar een nieuw evenwicht heeft gevonden. Het is interessant om te weten wat dit voor de waterstand betekent (Afbeelding 22).



Afbeelding 22: De waterstand in de hoofdgeul, ten opzichte van de initiële bodemhoogte. Goed te zien is dat de initiële waterstandsverlaging bovenstrooms verandert in een waterstandsverhoging. De uiteindelijke waterstandsverhoging (jaar 20) bedraagt 8,1mm.

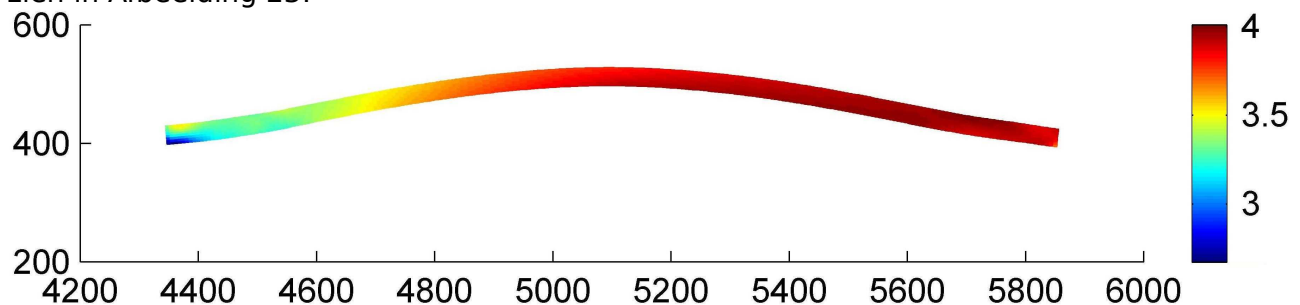
Uit deze figuur blijkt dat de initiële waterstandsverlaging bovenstrooms al vrij snel, namelijk na 4 jaar, is veranderd in een waterstandsverhoging. Dit betekent dat er binnen deze termijn al onderhoud nodig is in de hoofdgeul, om het waterstandsverlagingseffect van de nevengeul te waarborgen.

De waterstandsverhoging in jaar 20 bedraagt 8,1mm, voor het gehele bovenstroomse traject. Dat er in dit gedeelte waterstandsverhoging op de lange termijn optreedt, wordt ook door analytisch onderzoek voorspeld (Afbeelding 21). Het kwantitatieve effect op basis van analytische vergelijkingen is 1,4cm, en wordt dus duidelijk overschat ten opzichte van de 2D resultaten uit dit onderzoek.

Op basis van deze resultaten blijkt dus dat meestromende nevengeulen op de lange termijn contraproductief zijn, wanneer er geen aanvullende maatregelen worden toegepast.

6.5 Resultaat nevengeul

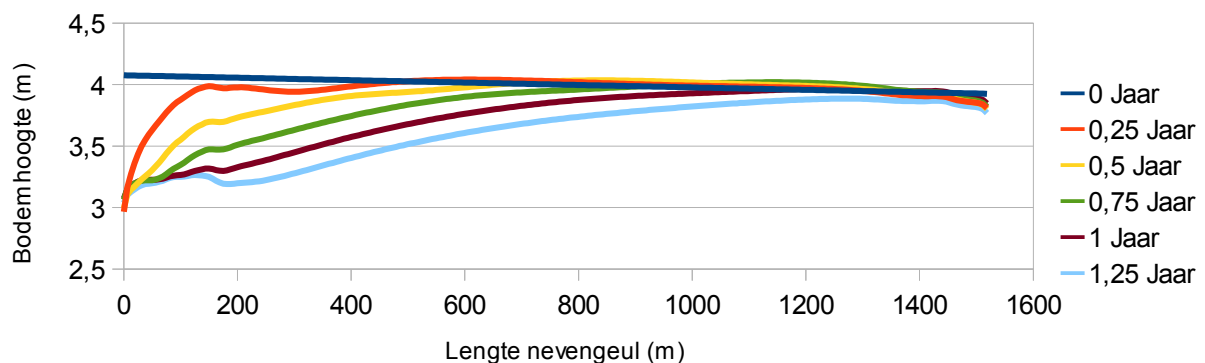
De nevengeul laat geen typische 2D patronen zien zoals alternerende banken. In de nevengeul is de breedte-diepte verhouding (12) hiervoor te klein. Wel valt op dat de transportcapaciteit hoger ligt dan de sedimentinstroom. Hierdoor ontstaat erosie, zoals te zien in Afbeelding 23.



Afbeelding 23: Bodemhoogte nevengeul na 1 jaar.

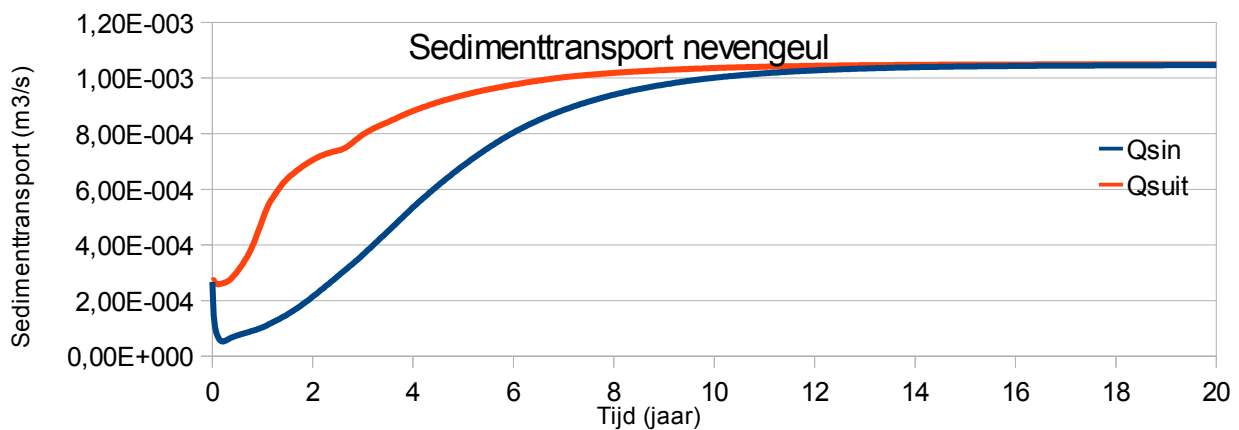
Deze afbeelding laat zien dat de erosie bovenstroomse begint. Na 1 jaar is hier 1,2m erosie opgetreden, terwijl verder benedenstrooms de bodemhoogte nog gelijk is aan de initiële bodemhoogte.

In een breedte-gemiddelde weergave ziet dat er dan als volgt uit.



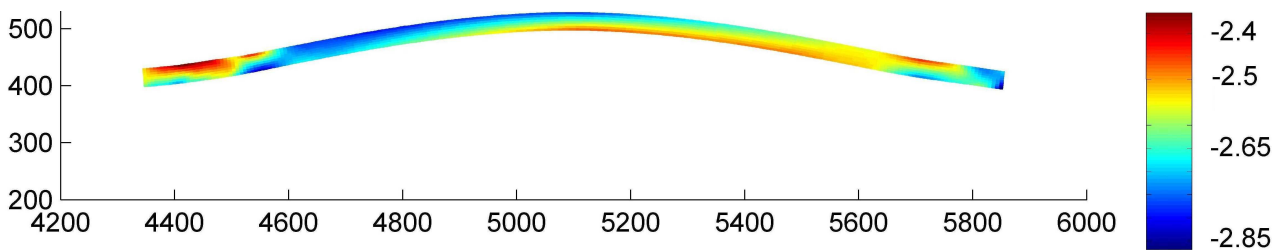
Afbeelding 24: Breedtegemiddelde bodemhoogte voor 5 kwartalen. Duidelijk te zien is dat de erosie zich steeds verder benedenstrooms uitbreidt.

Na 20 jaar is het systeem van hoofd- en nevengeul in een nieuw evenwicht. De instroom van sediment is dan gelijk aan de uitstroom van sediment (Afbeelding 25).



Afbeelding 25: In- en uitstroom van sediment door de tijd. Na 15 jaar is de instroom gelijk aan de uitstroom. Daarvoor is de uitstroom groter, wat betekent dat er erosie optreedt.

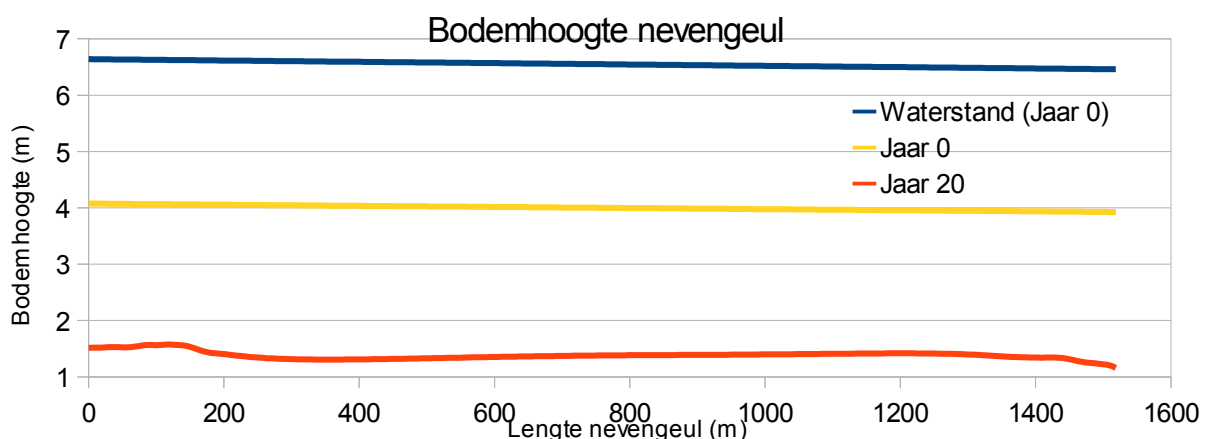
De nevengeul is gemiddeld 2,6m geërodeerd (Afbeelding 26). Het debiet door de nevengeul is dan ook toegenomen van 60m³/s naar 175m³/s. Dit is bijna 9,6% van het debiet in de hoofdgeul, en daarmee drie keer zo veel als de richtlijn.



Afbeelding 26: Uiteindelijke erosie (na 20 jaar) in de nevengeul.

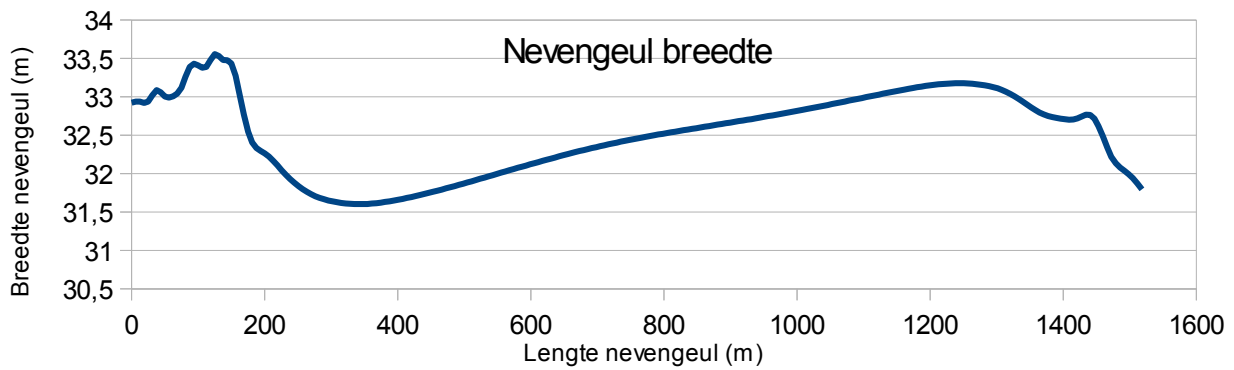
Afbeelding 26 geeft de uiteindelijke erosie (na 20 jaar) weer in de nevengeul. Goed te zien is dat zich een point bar heeft gevormd in de binnenbocht van de nevengeul. Een patroon van alternerende banken is hier verder niet waarneembaar. De breedte-diepte verhouding van de nevengeul is hiervoor ook te klein (namelijk 6 in de evenwichtssituatie) om alternerende banken te laten ontstaan.

Wat opvalt is dat zowel bij het begin als bij het uiteinde van de nevengeul de erosie enigszins afwijkt van het middengedeelte. Ook als dit breedte-gemiddeld wordt weergegeven is dit te zien (Afbeelding 27).



Afbeelding 27: Breedte-gemiddelde bodemhoogte zowel initieel als na 20 jaar. Ook is de initiële waterstand geplot.

Het verhang van de bodemhoogte na 20 jaar is niet gelijk over de nevengeul. Dit wordt veroorzaakt door de niet-uniforme breedte van de nevengeul. Deze laat namelijk eenzelfde soort patroon zien als de erosie (Afbeelding 28).



Afbeelding 28: De breedte van de nevengeul door de nevengeul heen.

Deze afbeelding laat duidelijk zien dat de breedte niet gelijk is door de nevengeul. Dit beïnvloedt de lokale snelheden, en daarmee het lokale morfologische gedrag, zoals Afbeelding 26 en 27 al duidelijk maakten.

Dat de nevengeul geen gelijk breedte heeft, komt doordat deze handmatig is aangemaakt door middel van 'splines' in RGF-Grid. Deze 'splines' bepalen de grenzen van het te ontwerpen rooster, en deze zijn handmatig aangemaakt. Hierdoor is het moeilijk de grenzen overal op precies 30m van elkaar te ontwerpen. De lokale verschillen in breedte hebben ook lokaal effect op de snelheid, en daarmee op het morfologische gedrag. Vandaar dat het gedrag ook niet geheel uniform is over de nevengeul.

7 Invloed individuele parameters

Binnen dit onderzoek is ook de invloed van enkele parameters in kaart gebracht. De morfologische evenwichtsbodemhoogtes in de nevengeul, als ook de sedimentatie in de hoofdgeul en de waarde voor de macht in de splitsingspuntrelatie, zijn voor alle simulaties in kaart gebracht. De evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul heeft als referentieniveau de bodemhoogte in de hoofdgeul op de benedenstroomse domeinrand. De hoofdgeul ter plaatse van de nevengeul ligt initieel 0,5 boven het referentieniveau.

De 2D-reactie (zoals alternerende banken) is hier verder niet beschreven, aangezien deze niet verschilt van de basisvariant.

7.1 Dwarshellingseffect

Het effect van een dwarshelling in Delft3D wordt meegenomen door de richting van het bodemtransport aan te passen. Ashield is de parameter die hiervoor gecalibreerd kan worden. De relatie tot de wijziging in richting van het transport is nogal ingewikkeld, en beschreven in paragraaf 5.4. Een normale waarde voor deze parameter is 0,7, welke ook is gebruikt in de basisvariant. Om te zien hoe gevoelig deze parameter is op het uiteindelijke resultaat, zijn ook de waarde 0,5 en 0,9 gesimuleerd. De resultaten staan hieronder.

Tabel 3: Resultaat dwarshellingseffect

Waarde	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Macht in splitsingspuntrelatie (-)
Ash = 0,5	1,30	0,44	1,64
Ash = 0,7 (basisvariant)	1,38	0,44	1,53
Ash = 0,9	1,60	0,41	1,57

Uit de tabel blijkt dat het verschil in bodemhoogte 8-22cm is ten opzichte van de basisvariant. Dit is daarmee een parameter die beperkt invloed heeft op het morfologische gedrag.

7.2 Spiraalstroming

Door spiraalstroming wordt het sedimenttransport van richting veranderd. De parameter om dit effect te calibreren is Espir. In welke relatie deze parameter gebruikt wordt staat in paragraaf 5.4. Er is voor gekozen om waardes 0, 0,8, 1,2 en 1,6 te testen, waarbij in de basisvariant een waarde 1,0 wordt gebruikt.

Bij het simuleren van hogere waardes van Espir, bleken de simulaties vast te lopen. Er ontstonden grote verstoringen in de bodemhoogte, maar de reden hiervoor is niet duidelijk. Het bleek echter dat deze niet optraden wanneer gekozen werd om de nevengeul op dezelfde hoogte aan te leggen als de hoofdgeul. Aangezien al is aangetoond dat de uiteindelijke evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul niet afhankelijk is van de aanleghoogte, maakt dit voor het resultaat in evenwicht niet uit. De resultaten van simulaties met Espir staan hieronder.

Tabel 4: Resultaat spiraalstroming, waarbij de aanleghoogte van de nevengeul gelijk is aan de hoofdgeul

Waarde	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Macht in splitsingspuntrelatie (-)
Espir = 0	1,37	0,44	1,52
Espir = 0,8	1,37	0,44	1,53
Espir = 1,0 (basisvariant)	1,38	0,44	1,53
Espir = 1,2	1,39	0,43	1,53
Espir = 1,6	1,41	0,43	1,53

De bodemhoogtes verschillen nauwelijks van elkaar, en de Y-waarde zijn door afronding op 2 decimalen zelfs gelijk. Deze parameter heeft dus nauwelijks invloed op het resultaat.

7.3 Sedimentgrootte

Om de invloed van de grootte van sediment in kaart te brengen zijn er situaties doorgerekend met een D50 van 0,8mm, 1,6mm, 2,0mm, 2,4mm en 3,2mm. Hierbij zijn geen D10 en D90 gespecificeerd, zoals bij de basisvariant. Voor de basisvariant zijn de D10 en D90 namelijk overgenomen uit eerder onderzoek, maar voor de D50's hier getest is dat niet beschikbaar. Vandaar dat de D10 en D90 hier niet zijn gespecificeerd. Voor deze simulaties is de waarde van de bovenstroomse morfologische randvoorwaarde aangepast, zodat in de situatie zonder nevengeul de bodemhoogte constant blijft.

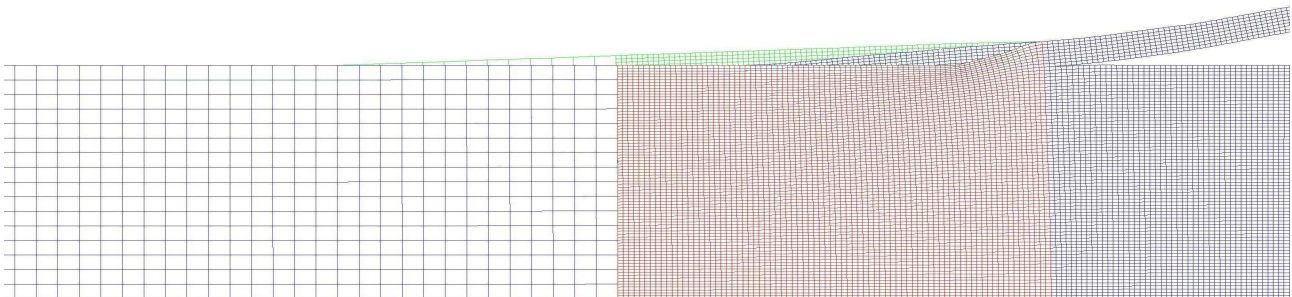
Tabel 5: Resultaat verschillende sedimentgroottes

Waarde	Randvoorwaarde (m ³ /s/m)	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Macht in splitsingspuntrelatie (-)
D50 = 0,8mm	0,00013327	1,67	0,41	1,45
D50 = 1,6mm	0,00006656	1,46	0,43	1,49
D50 = 2,0mm	0,00005327	1,38	0,43	1,51
D50 = 2,4mm	0,00004439	1,38	0,44	1,52
D50 = 3,2mm	0,00003330	1,34	0,44	1,56

De verschillen in de uiteindelijke evenwichtsdiepte zijn niet groot. Aangezien er voor deze twee mediane sedimentdiameters geen D10 en D90 zijn opgegeven, is dit resultaat niet goed vergelijkbaar met de basisvariant, waar D10 en D90 wel zijn opgegeven.

7.4 Bifurcatiehoek

De grootte van de bifurcatiehoek heeft invloed op het Bulle effect. Dit effect is drie-dimensionaal, maar het resultaat ervan kan ook binnen twee-dimensionaal modelleren worden meegenomen. Afbeelding 30 geeft de hoek van de basisvariant weer, inclusief een grotere en kleinere hoek die gesimuleerd zijn. Wegens de richtlijnen voor orthogonaliteit heeft de simulatie met grote hoek een bifurcatiehoek van 16,66°. Bij een grotere hoek zou de orthogonaliteit te groot worden, waardoor de simulatie niet meer betrouwbaar is. Een grote hoek van bijvoorbeeld 90° is daarom niet getest in dit onderzoek.



Afbeelding 29: Drie verschillende bifurcatiehoeken: 1,87 graden (kleine hoek) 4,59 graden (basisvariant) en 16,66 graden (grote hoek) in respectievelijk groen, blauw en rood.

Tabel 6: Resultaat diverse bifurcatiehoeken

Waarde	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Exponent in splitsingspuntrelatie (-)
Hoek = 1,87°	1,13	0,46	1,66
Hoek = 4,59° (basisvariant)	1,38	0,44	1,53
Hoek = 16,66°	2,23	0,31	1,40

Hieruit blijkt dat de bifurcatiehoek een behoorlijke invloed heeft op het resultaat. Zeker bij de 'grote' hoek erodeert de nevengeul een stuk minder dan de basisvariant. Dit heeft er waarschijnlijk mee te maken dat de hoeveelheid debiet die naar de nevengeul geleid wordt kleiner is. Hierdoor zal de afvoercapaciteit van de nevengeul eerder in evenwicht zijn met de hoeveelheid debiet die naar de nevengeul wordt geleid.

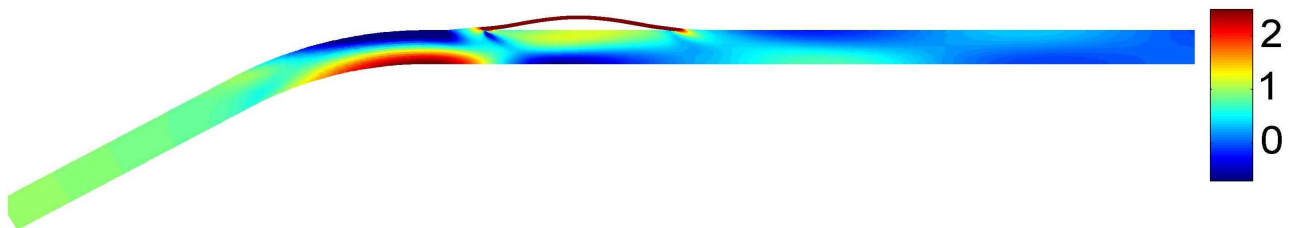
Door kribben kunnen bifurcatiehoeken in werkelijkheid tot ongeveer 90° oplopen, dus hierdoor kunnen nog hogere bodemhoogtes in nevengeulen worden verwacht. Het verdient aanbeveling dit in een nader onderzoek te bestuderen.

7.5 Buitenbocht

Er zijn drie simulaties gemaakt met een nevengeul die benedenstrooms van een buitenbocht aftakt op de hoofdgeul. Hierbij is de radius van de bocht 3km, zodat de verhouding radius – breedte voor de hoofdgeul gelijk is aan 10. Deze verhouding wordt binnen het onderzoek van Kleinhans et al. (2008) als een scherpe bocht beschouwd. Zo is het effect van spiraalstroming sterk, en kan de gevoeligheid hiervan goed in kaart worden gebracht.

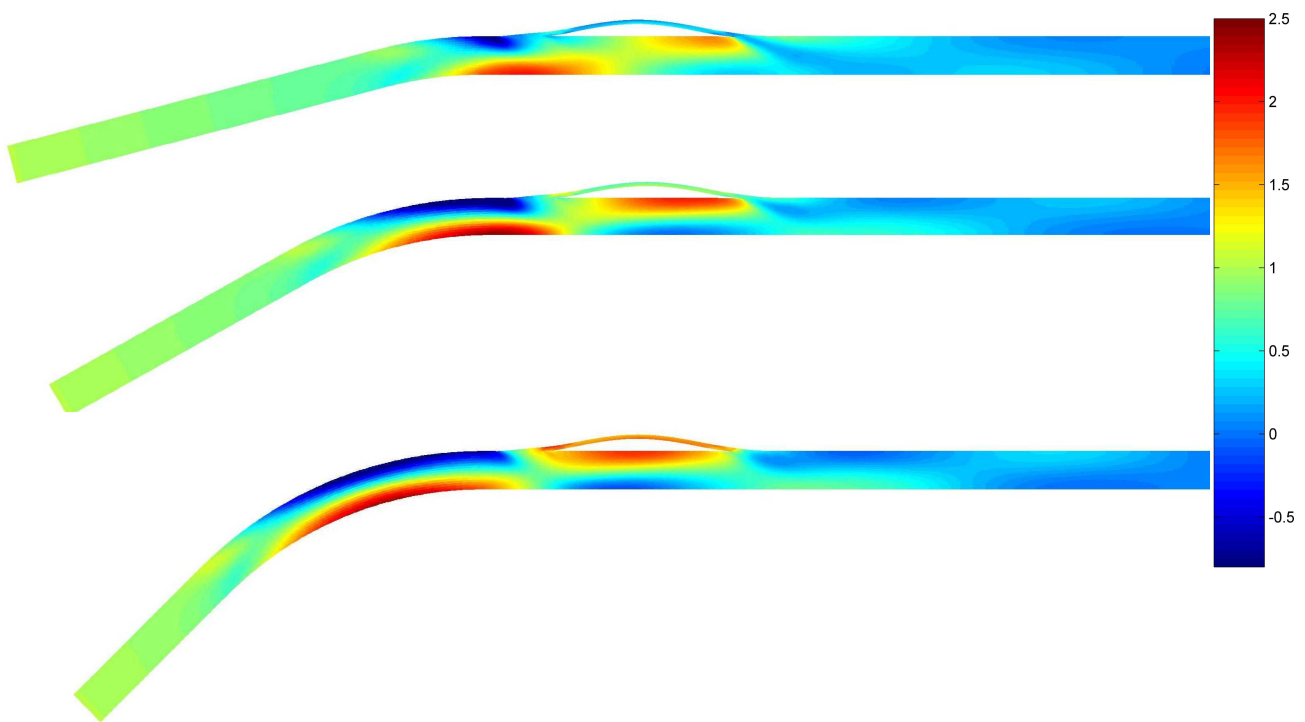
De verschillen in de simulaties zit in hoe lang de bocht doorloopt. Er zijn drie bochten doorgerekend, met bochten van 15°, 30° en 45° (zie Afbeelding 31).

Voor deze simulaties is eerst alleen de hoofdgeul doorgerekend, dus zonder nevengeul. De dan ontstane bodemligging (met diepe buitenbocht en ondiepe binnenbocht) wordt dan gebruikt als initiële bodemligging voor de simulatie met nevengeul. Zo wordt ervoor gezorgd dat de simulatie lijkt op het aanleggen van een nevengeul in een bestaande rivier (waar ook een dwarsverhang aanwezig is in een bocht). Als voorbeeld hiervan is in Afbeelding 30 deze bodemligging weergegeven, voor de buitenbocht van 30 graden.



Afbeelding 30: Initiële bodemligging van hoofd- en nevengeul. De bodemligging in de hoofdgeul is het resultaat van een simulatie waarbij de nevengeul niet is aangelegd. De bodem van de nevengeul ligt op 4m, en valt daarmee buiten de schaal op deze tekening.

De resultaten van de simulatie in evenwicht zijn hierna eerst twee-dimensionaal weergegeven. Daarna zijn de resultaten samengevat in een tabel.



Afbeelding 31: Bodemligging na 20 jaar morfologisch doorrekenen voor drie simulaties met de nevengeul benedenstrooms van een buitenbocht. De bochten lopen 15 (boven), 30 (midden) en 45 (onder) graden door.

Hoewel de bochten op dezelfde afstand bovenstrooms van de nevengeul overgaan in een rechte geul, loopt de sedimentatie/erosie wel anders door. De bocht van 15° (boven) heeft precies een erosiekuil voor de instroomopening, terwijl bij de bocht van 45° (onder) er juist een drempel ligt. Dit heeft uiteraard grote invloed op het bodem-transport richting de nevengeul.

Afbeelding 31 laat zien dat de bodemhoogte bij de instroomopening een sterke invloed hebben op het morfologische gedrag. Bij de simulatie met een buitenbocht van 15 graden is deze laag, terwijl bij de buitenbocht van 45 graden deze hoog is. Bij de bocht van 15 graden stroomt er daarom minder sediment richting de nevengeul, waardoor deze een relatief lage bodemhoogte ontwikkeld. Bij de bocht van 45 graden stroomt er juist meer sediment richting de nevengeul, waardoor de bodemhoogte hier relatief hoger ligt.

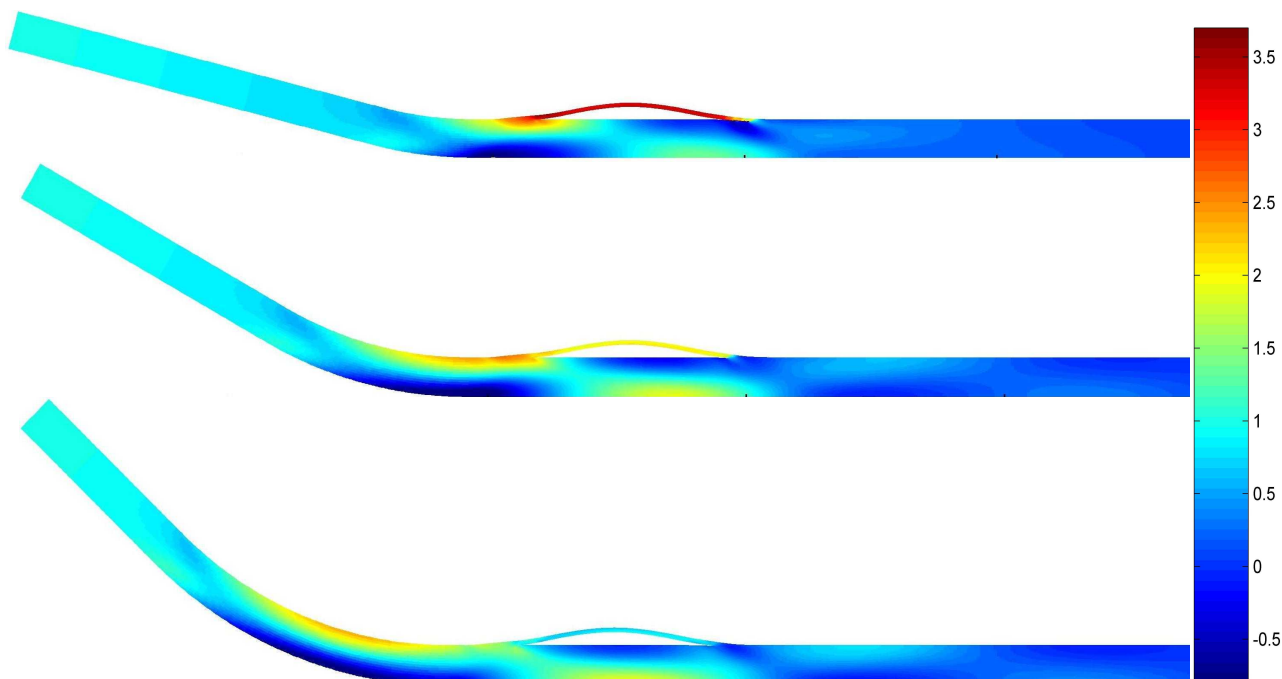
Tabel 7: Resultaat nevengeul met bovenstroomse buitenbocht

Waarde	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Exponent in splitsingspuntrelatie (-)
Buitenbocht = 15°	0,27	0,58	1,27
Buitenbocht = 30°	0,85	0,50	2,83
Buitenbocht = 45°	1,61	0,43	1,10

De verschillen in evenwichtsdiepte zijn dus zeer groot. Hieruit blijkt dat de bodemhoogte voor de instroomopening, in dit geval afhankelijk van een bovenstroomse bocht, sterke invloed heeft op het morfologische gedrag. Het verschil in bodemhoogte van de nevengeul kan oplopen tot 1,3m.

7.6 Binnenbocht

Er zijn in eerste instantie drie simulaties gemaakt met de aantakking van een nevengeul benedenstrooms van een binnenbocht. De bochten zijn op dezelfde wijze vormgegeven als de buitenbochten (radius 3km, doorloop 15°, 30° en 45°). De resultaten zijn weergegeven in Afbeelding 32.



Afbeelding 32: Bodemligging na 20 jaar morfologisch doorrekenen voor drie simulaties met de nevengeul benedenstrooms van een binnenbocht. De bochten lopen 15 (boven), 30 (midden) en 45 (onder) graden door.

Ook hier blijkt de bodemhoogte bij de instroomopening een grote invloed te hebben op de evenwichtsbodemhoogte van de nevengeul. Bij de bocht van 15 graden is de bodemhoogte van de instroomopening relatief groot, wat leidt tot een hoge nevengeul (3,3m). Bij de binnenbocht van 30 graden is de bodemhoogte bij de instroomopening kleiner, en daarmee ook de bodemhoogte van de nevengeul. Bij de bocht van 45 graden is de bodemhoogte van de instroomopening relatief klein, wat leidt tot een zeer lage bodemhoogte in de nevengeul.

Naast de drie hiervoor genoemde nevengeulen benedenstrooms van een binnenbocht, zijn daar nog drie simulaties met binnenbochten aan toegevoegd. Hierdoor bleek namelijk de relatie van de evenwichtswaterdiepte in de nevengeul met de exponent in de splitsingspuntrelatie beter in kaart gebracht kunnen worden. Dit is in Hoofdstuk 9 beschreven.

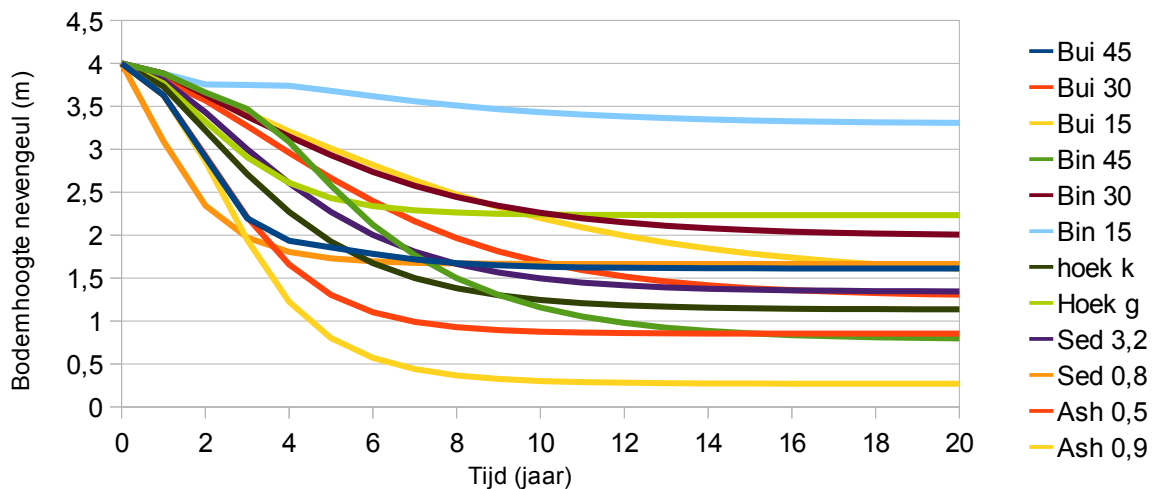
Tabel 8: Resultaat nevengeul met bovenstroomse binnenbocht

Waarde	Bodemhoogte nevengeul (m)	Sedimentatie hoofdgeul (m)	Exponent in splitsingspuntrelatie (-)
Binnenbocht = 15°	3,31	0,23	1,67
Binnenbocht = 30°	2,00	0,36	1,71
Binnenbocht = 32°	1,79	0,38	1,83
Binnenbocht = 35°	1,46	0,42	2,13
Binnenbocht = 40°	0,99	0,47	3,71
Binnenbocht = 45°	0,78	0,49	9,70

Evenals bij de buitenbocht levert de aantakking van een nevengeul benedenstrooms van een binnenbocht sterke verschillen op in morfologisch gedrag. Het verschil kan oplopen tot meer dan 2,5m.

7.7 Tijdschalen

Binnen dit onderzoek is in kaart gebracht op welke tijdschaal evenwicht wordt bereikt. Dit is gedaan door de gemiddelde bodemhoogte in de nevengeul in de tijd weer te geven, zie Afbeelding 33.

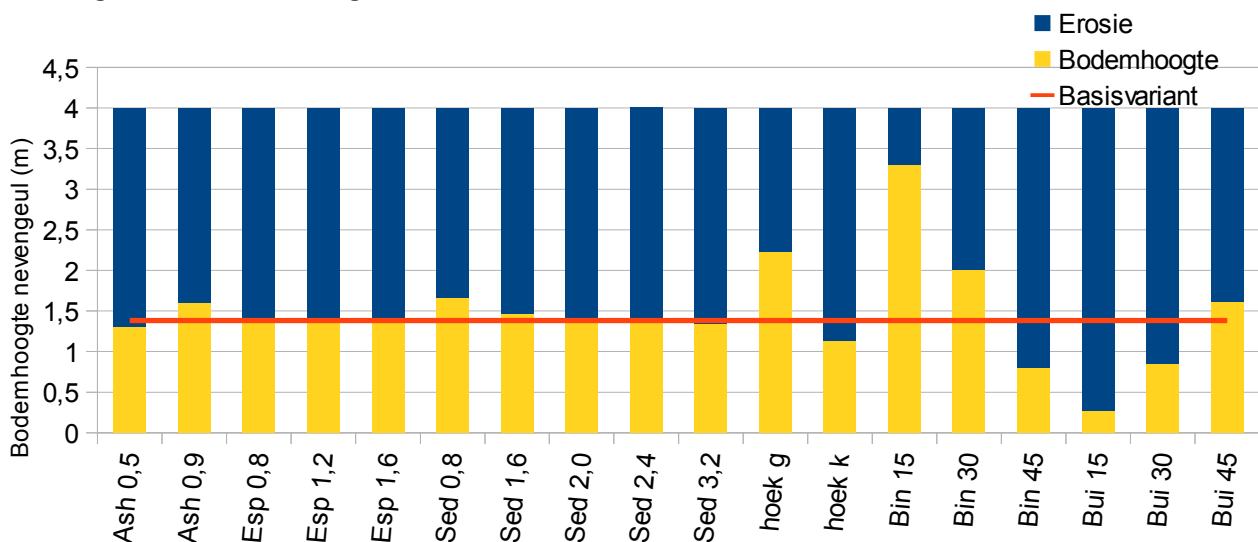


Afbeelding 33: Gemiddelde bodemhoogte in de tijd van alle simulaties. Na 10-15 jaar zijn vrijwel alle simulaties in evenwicht, er treden er geen veranderingen in bodemhoogte meer op.

Evenwicht treedt op tussen 10 en 15 jaar, en de onderlinge variatie van de simulaties hierin is klein. Klop (2009) concludeerde op basis van de resultaten dat onderhoud noodzakelijk is afhankelijk van de aanleg (d.w.z. de macht in de splitsingspuntrelatie), maar tussen 3 en 70 jaar. De spreiding van de resultaten uit 2D onderzoek is dus veel kleiner. Wel moet worden opgemerkt dat binnen dit onderzoek geen sedimenterende nevengeul is gemodelleerd, en daarmee is het niet duidelijk hoe snel een sedimenterende nevengeul evenwicht bereikt.

7.8 Samenvatting

De resulterende bodemhoogte van de nevengeul van de diverse simulaties zijn samengevat in Afbeelding 34.



Afbeelding 34: De uiteindelijke bodemhoogte van de nevengeul en de daarbij samenhangende erosie. In rood het resultaat van de basisvariant.

Uit deze afbeelding blijkt dat er twee parameters zijn die sterke invloed hebben op het resultaat. Dit zijn de bifurcatiehoek, en de aantakking op een bovenstroomse bocht. Hierbij kunnen zowel een bovenstroomse binnenbocht als buitenbocht een sterke invloed op de

uiteindelijke bodemhoogte in de nevengeul, waarbij zowel een grote of kleine bodemhoogte kan worden bereikt. De invloed van bochten wordt veroorzaakt door de verhoging of verlaging van de instroomopening, waardoor er veel respectievelijk weinig sediment richting de nevengeul stroomt.

De invloed van de bifurcatiehoek kan verklaard worden door de invloed op de debietonttrekking van de nevengeul. Een kleine bifurcatiehoek betekent dat er veel debiet naar de nevengeul wordt geleid. Is de afvoercapaciteit van de nevengeul hiervoor echter te klein (zoals bij de basisvariant), dan treedt erosie op. Een grotere bifurcatiehoek zorgt ervoor dat er minder debiet richting de nevengeul wordt geleid, en dus dat de afvoercapaciteit van de nevengeul niet zo sterk hoeft te nemen. Dit resulteert dan in een hogere evenwichtsbodemhoogte van de nevengeul.

De andere parameters die binnen dit onderzoek zijn getest blijken weinig invloed te hebben op de evenwichtsbodemhoogte van de nevengeul.

8 Vergelijking 1D/2D

De resultaten van dit (2D) onderzoek zijn vergeleken met het (1D) onderzoek van Klop (2009). Hierbij valt op dat de nevengeulen bij dit onderzoek allen eroderen, terwijl bij 1D ook sedimentatie optreedt (paragraaf 8.1). Daarbij blijkt dat een belangrijke parameter in 1D-onderzoek (de macht in de splitsingspuntrelatie) niet constant is in de tijd, terwijl deze bij 1D-onderzoeken wel zo wordt gebruikt (paragraaf 8.2). Verder is beschreven dat ook voor situaties waarbij uit 1D onderzoek blijkt dat altijd instabiliteit optreedt, dit niet bevestigd wordt door 2D resultaten (paragraaf 8.3). Daarop wordt geconcludeerd dat studies naar meestromende nevengeul beter in 2D kunnen worden uitgevoerd (paragraaf 8.5).

8.1 Sedimentatie versus erosie

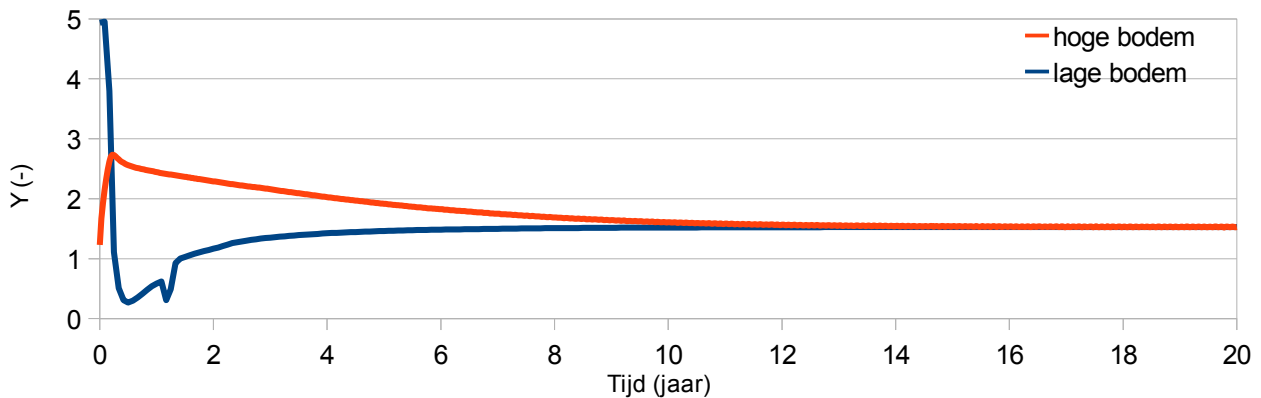
Bij het vergelijken van de resultaten van dit onderzoek met eerdere onderzoek van Klop (2009), dan valt als eerste op, dat Klop (2009) een sedimenterende nevengeul heeft gemodelleerd, terwijl bij dit onderzoek eroderende nevengeulen zijn gemodelleerd. De verschillen in morfologische reactie (sedimentatie/erosie) tussen 1D en 2D onderzoek, zijn ook te zien in de initiële snelheden van de nevengeul. De initiële snelheid in de basisvariant hier (0,78m/s) is een stuk groter dan die van Klop (2009) (0,57m/s). Dit heeft met twee ontwerpaspecten te maken. Enerzijds is dat de nevengeullengte, en anderzijds in bifurcatiehoek. Merk trouwens op dat beide snelheden groter zijn dan de richtlijn van maximaal 0,3m/s.

Zoals hiervoor al is opgemerkt de nevengeullengte voor een verschil in morfologisch gedrag zorgt. Er is namelijk een groot verschil in nevengeullengte tussen beide onderzoeken. Hoewel de in- en uitstroomopening hemelsbreed in beide onderzoeken 1,5km uit elkaar liggen, is de nevengeullengte bij 1D 2,5km en bij 2D 1,53km. Hierdoor is er een groot verschil in het verhang tussen beide nevengeulen, welke de snelheid beïnvloed (immers: $u=C(h_i)^{0.5}$). Ook in het analytische onderzoek van Klop (2009) blijkt dat een grotere nevengeullengte tot een kleinere evenwichtsdiepte in de nevengeul leidt. Bij het bekijken van het rooster van de basisvariant, lijkt dit een realistisch lengte van een nevengeul. De nevengeullengte in 1D, van 2,5km op een hoofdgeul lengte van 1,5km lijkt een onrealistisch lange nevengeul, waarvoor in het algemeen geen ruimte is om deze aan te leggen. Het ontwerp van de nevengeul van Klop (2009) is dus ongelukkig gekozen.

De andere ontwerpparameter die voor verschillend morfologisch gedrag zorgt is de bifurcatiehoek. Deze wordt in 1D alleen indirect meegenomen (in de macht van de splitsingspuntrelatie), maar is binnen dit 2D onderzoek vrij klein gekozen. Door de kleine bifurcatiehoek wordt er veel debiet richting de nevengeul gestuurd, maar de afvoercapaciteit van de nevengeul is hiervoor niet groot genoeg. Dat dit dan resulteert in erosie, zodat de afvoercapaciteit van de nevengeul toeneemt, is dan niet vreemd.

8.2 Macht in splitsingspuntrelatie in de tijd

De parameter die de morfologische reactie bepaald bij 1D-modelleren is de macht in de splitsingspuntrelatie. De morfologische reactie wordt namelijk bepaald door de sedimentverhouding over hoofd- en nevengeul, en deze wordt gevonden als de debietverhouding tot macht Y (de macht van de splitsingspuntrelatie), zie Vergelijking (1). Bij 2D modelleren wordt deze macht niet gebruikt, maar het is wel mogelijk om de waarde van de macht achteraf te berekenen. Dan zijn namelijk alle andere variabelen uit Vergelijking (1) bekend. Het resultaat voor twee verschillende aanleghoogtes is weergegeven in Afbeelding 35. De eerste aanleghoogte is de basisvariant, die 3,5m hoger ligt dan de hoofdgeul ('hoge bodem'). De tweede aanleghoogte is voor een situatie waarbij de nevengeul op dezelfde hoogte ligt als de hoofdgeul ('lage bodem').



Afbeelding 35: De waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie door de tijd. Zowel voor de basisvariant met de nevengeul op hoogte (+3,5m boven de hoofdgeul), als voor een situatie waarbij initieel de bodem-hoogte in de nevengeul gelijk is aan de hoofdgeul.

Een eerste constatering uit deze afbeelding is dat onafhankelijk van de aanleghoogte dezelfde waarde voor de macht van de splitsingspuntrelatie wordt bereikt na 15 jaar. Het lijkt er dus op dat er bij een bepaald nevengeul-ontwerp een evenwichtswaarde hoort, onafhankelijk van de aanleghoogte. Deze evenwichtswaarde is ook gekoppeld aan een evenwichtsbodemhoogte, want voor de twee simulaties wordt dezelfde evenwichtshoogte bereikt (voor zowel hoofd- als nevengeul).

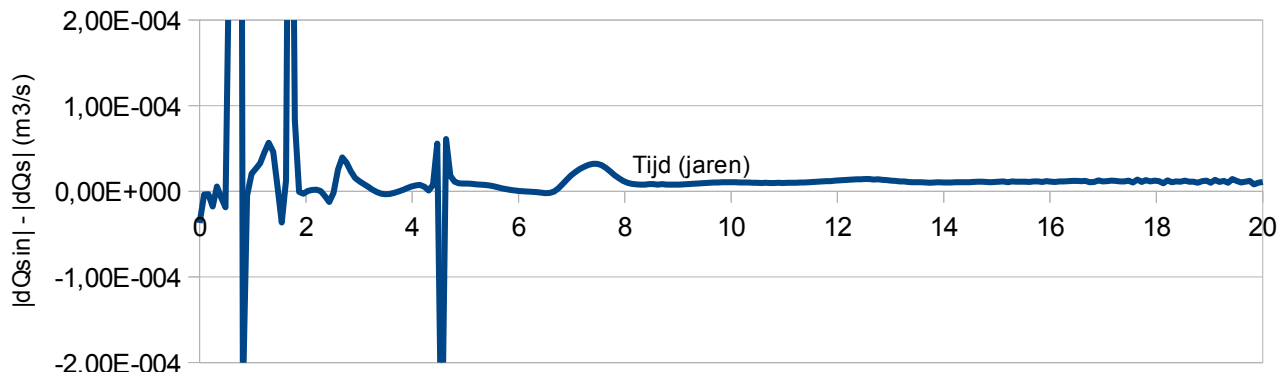
Het tweede dat opvalt in Afbeelding 35, is dat de macht van de splitsingspuntrelatie niet constant is in de tijd. Hier wordt bij 1D onderzoek wel vanuit gegaan, wat dus een foutieve aanname is. Dat betekent dat de sedimentverhouding in de tijd niet zo eenvoudig te berekenen is als wordt aangenomen in de splitsingspuntrelatie van Wang et al. (1995). Bij een niet-constante macht (in de tijd) is de sedimentverdeling (in de tijd) namelijk anders is dan bij een constante exponent. Dit beïnvloedt dan ook de tijdschalen waarop morfologische veranderingen optreden. Voor de basisvariant betekent dit dat, omdat de macht grotendeels groter is dan de evenwichtswaarde, er minder sediment de nevengeul instroomt dan berekend met de (constante) evenwichtswaarde, zie bijlage VI. Hierdoor treedt erosie in 2D sneller op dan in 1D. Een analoge redenering kan worden uitgevoerd voor de lage aanleghoogte, en resulteert in de constatering dat sedimentatie sneller verloopt in 2D dan in 1D. De tijd totdat een evenwicht wordt bereikt, is dus bij 2D onderzoek korter dan bij 1D onderzoek.

8.3 Geen instabiliteit in 2D

Uit onderzoek van Wang et al. (1995) blijkt dat wanneer de macht van de splitsingspuntrelatie kleiner is dan ' $n/3$ ', een instabiele situatie ontstaat. Volgens Klop (2009) leidt dit altijd tot volledige sedimentatie van de nevengeul. Uit het 2D onderzoek blijkt echter dat ook voor deze situatie er geen volledige sedimentatie optreedt. Dit is in deze paragraaf beschreven.

Bij de transportformule van Engelund en Hansen geldt $n=5$, wat betekent dat de macht (in evenwicht) uit Afbeelding 35 ($=1,53$) kleiner is dan ' $n/3$ '. Dit betekent dat er sprake is van een instabiele situatie is. Toch leidt voor zowel de hoge aanleghoogte als de lage aanleghoogte niet tot een volledige sedimentatie van de nevengeul.

In paragraaf 2.3.1 staat beschreven dat bij een instabiele situatie, de absolute verandering in sedimentinstroom kleiner is dan de absolute verandering in transportcapaciteit. Dit zou optreden voor een waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie kleiner dan $n/3$. Om dit te verifiëren zijn voor de lage aanleghoogte de parameters in kaart gebracht (Afbeelding 36). Er is voor deze aanleghoogte gekozen, omdat voor deze hoogte gedurende de gehele simulatie-periode (uitgezonderd de eerste drie maanden) de macht in de splitsingspuntrelatie kleiner is dan $n/3$, dus dit zou een instabiele situatie moeten opleveren.



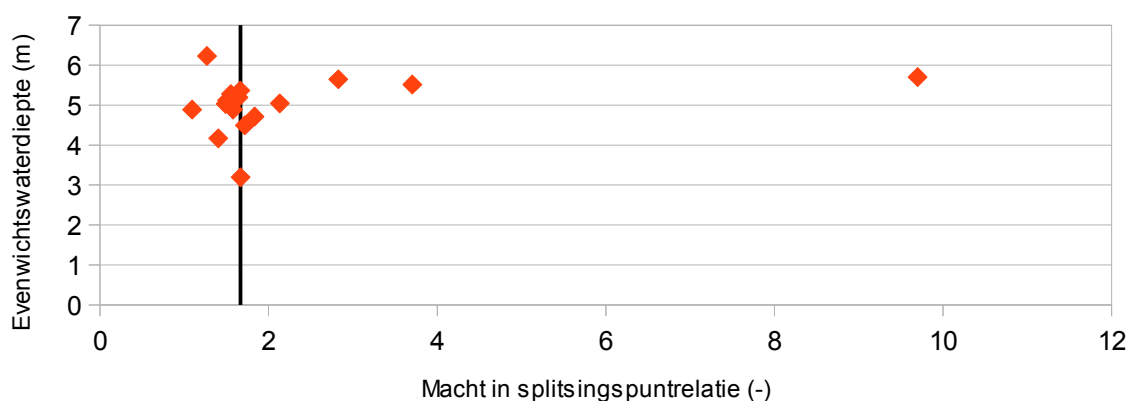
Afbeelding 36: De absolute verandering in sedimentinstroom (bij de instroomopening) minus de absolute verandering in transportcapaciteit (sedimenttransport bij de uitstroomopening) voor de basisvariant met lage aanleghoogte (de tijd tussen de datapunten is 1 maand). Deze waarde is over het algemeen positief, op enkele negatieve piekjes na.

In paragraaf 2.1 is beschreven dat door Wang et al. (1995) is aangetoond dat een waarde van de exponent van de splitsingspuntrelatie kleiner dan $n/3$, leidt tot een instabiele situatie. Hierbij wordt een verstoring (erosie/sedimentatie) versterkt, omdat de waarde uit Afbeelding 36 negatief is. Het blijkt echter dat in 2D, ondanks dat de exponent in de splitsingspuntrelatie kleiner is dan $n/3$, de waarde in Afbeelding 36 voornamelijk positief is, en dit dus niet hoeft te leiden tot een instabiele situatie.

Dus ondanks dat voor de simulatie gedurende 20 jaar geldt dat de exponent van de splitsingspuntrelatie kleiner is dan $n/3$, leidt dat niet tot een instabiele situatie met een volledige verzanding van de nevengeul. Dit is dus een duidelijk verschil tussen 1D en 2D resultaten. Ook Kleinhans et al. (2008) concluderen dat bij hun onderzoek bij vrijwel alle simulatie beide benedenstroomse geulen openblijven. Dus een instabiele situatie is niet in 2D onderzoek geproduceerd. Daarmee zijn 1D resultaten op basis van de splitsingspuntrelatie van Wang et al. (1995) verschillend van de 2D-resultaten.

8.4 Relatie waterdiepte en exponent splitsingspuntrelatie

Voor elke simulatie is de waarde van de exponent in de splitsingspuntrelatie in kaart gebracht, voor de situatie in evenwicht. Deze is daarbij ook gekoppeld aan de waterdiepte in evenwicht, zoals ook door Klop (2009) is gedaan, zie Afbeelding 3. Dit levert de volgende figuur op.



Afbeelding 37: De waarde van de exponent in de splitsingspuntrelatie (voor evenwichtssituatie) en bijbehorende evenwichtswaterdiepte op basis van 2D resultaten. Waterdiepte in de hoofdgeul is 6,032m. De initiële waterdiepte in de nevengeul is 2,5m. De scheidingslijn is getekend voor $n/3$ (bij Engelund en Hansen geldt $n=5$ en dus $n/3=1,667$).

Uit Afbeelding 37 blijkt dat bij de meeste simulaties de macht in de splitsingspuntrelatie een waarde tussen 1 en 2 te hebben. De simulatie met de kleinste uiteindelijke waterdiepte (3,2m) heeft een waarde van de exponent van 1,667, wat net groter is dan $n/3$. Een andere simulatie met een waarde van 1,664 (net kleiner dan $n/3$) leidt tot een waterdiepte van 5,4m. Zo blijkt dat bij 2D-onderzoek de gevoeligheid van de exponent van de splitsingsrelatie rondom $n/3$ groot is, zoals ook al was geconcludeerd uit 1D-onderzoek door Klop (2009).

Verder laat deze grafiek zien dat voor waarden groter dan $n/3$, het gedrag van de nevengeul vergelijkbaar is met dat van Klop (2009), zoals weergegeven in Afbeelding 3. Dicht bij waarden van $n/3$ ontstaat een grotere bodemhoogte (of lagere evenwichtswaterdiepte) in de nevengeul dan voor grotere waarden van de exponent in de splitsingspuntrelatie. Zes van de zeven waarden groter dan $n/3$ zijn van simulaties met een bovenstroomse binnenbocht.

Voor waarden van de macht van de splitsingspuntrelatie van minder dan $n/3$ is er een minder duidelijk patroon. Het patroon van Klop (2009) dat bij $n/3$ een zeer grote evenwichtswaterdiepte ontstaat, en daalt bij kleinere waarden, is hier niet zo duidelijk zichtbaar. De waarden van de macht van de splitsingspuntrelatie liggen tussen 1 en 1,6, en de waterdiepte 4,1m en 6,2m. In ieder geval wordt duidelijk dat ook voor simulaties met een waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie kleiner dan $n/3$ stabiele oplossingen ontstaan, waarbij zowel hoofd- als nevengeul open blijft. Daarmee verschilt dit resultaat dus met eerder 1D onderzoek.

8.5 Modelleren meestromende nevengeul in 1D/2D

Op basis van de vergelijking van de eerdere resultaten van Klop (2009) in 1D en de 2D resultaten van dit onderzoek, is nagedacht over de voor- en nadelen van 1D-modelleren ten opzichte van 2D modelleren.

Het voordeel van 1D is de korte simulatietijd. Het blijkt echter dat bij 2D-onderzoek de simulatietijd ook beperkt kan blijven, door te werken met een grote vermenigvuldigingsfactor. Deze kan echter alleen worden toegepast bij een constante afvoer, zoals binnen dit onderzoek.

Er zijn echter ook nadelen aan meestromende nevengeulen in 1D modelleren. Zo is in Hoofdstuk 2 al beschreven dat 1D-modelleren niet geschikt is om morfologische voorspellingen te doen voor nevengeulen die nog aangelegd moeten worden. De waarde van de exponent in de splitsingspuntrelatie, die de morfologische reactie bepaalt, is namelijk alleen door calibratie te achterhalen. En voor een nevengeul die nog aangelegd moeten worden, bestaat er geen data om een calibratie uit te voeren.

In hoofdstuk 2 staat uitgelegd dat 1D wel gebruikt kan worden om tijdschalen te berekenen waarop de morfologische reactie plaatsvindt. Door domweg het resultaat van diverse waardes voor de macht in de splitsingspuntrelatie in kaart te brengen, kan wel gekeken worden wanneer onderhoud noodzakelijk is. Uit de analyse van 2D-resultaten blijkt echter dat deze macht niet constant is in de tijd, waar bij 1D-onderzoek wel van wordt uitgegaan. De verdeling van sediment over hoofd- en nevengeul, die door deze exponent wordt bepaald, is dus verschillend voor een constante exponent en een niet-constante macht. Dat betekent dat ook de tijdschaal waarop de morfologische reactie plaatsvindt verschillend is voor een constante en een niet-constante macht. Kwalitatief kan gesteld worden dat een 1D morfologische reactie trager plaats vindt (door de constante macht) dan een 2D morfologische reactie. Het is onduidelijk hoe groot dit verschil kwantitatief is, omdat de nevengeul van Klop (2009) op diverse punten afwijken van de nevengeulen van dit onderzoek, zoals beschreven in paragraaf 8.1. Een kwantitatieve vergelijking was daarom niet goed mogelijk.

Het blijkt dus dat 1D-modelleren ook niet geschikt is voor het in kaart brengen van de tijdschalen van de morfologische reactie. En dan is nog niet eens aan bod gekomen dat de voorspelde instabiliteit voor een waarde van de macht in de splitsingspuntrelatie kleiner dan $n/3$ uit 1D-onderzoek, in 2D niet te reproduceren is. Bij geen enkele simulatie voor deze conditie (althans, voor het grootste gedeelte van de tijd) is volledige verzanding opgetreden, wat wel voorspeld is door 1D-onderzoek. Ook is gebleken dat de evenwichtswaarde van deze macht bij sommige simulaties kleiner is dan $n/3$. Deze zou dan dus niet gebruikt kunnen worden in 1D, omdat deze altijd leidt tot instabiliteit, terwijl uit 2D onderzoek blijkt dat beide geulen open blijven.

Op basis van al deze constatering kan geconcludeerd worden dat meestromende nevengeulen beter in 2D gemodelleerd kan worden dan in 1D. Enerzijds is dat omdat enkele onderliggende aannames van 1D niet blijken te kloppen. Anderzijds kan ook gesteld worden dat het nadeel van 2D, de rekentijd, goed beperkt gehouden kan worden door een grote vermenigvuldigingsfactor.

Hierbij kan nog wel worden opgemerkt dat binnen het onderzoek van Kleinhans et al. (2008) ook een andere splitsingspuntrelatie is getest (van Bolla Pittaluga et al. (2003)). Deze voorspelde stabiele splitsingen, in tegenstelling tot de splitsingspuntrelatie van Wang et al. (1995). Toch bleken er kwantitatief grote verschillen met de 3D resultaten van hun onderzoek. Hieruit kan daarom ook opgemaakt worden dat 2D (of zelfs 3D) aanbevolen kan worden boven 1D-modelleren.

9 Discussie

Binnen dit hoofdstuk zijn enkele aannames ter discussie gesteld die in de basisvariant gemaakt zijn (paragraaf 9.1). Hierbij wordt ingegaan op de verwachte morfologische ontwikkeling van hoofd- en nevengeul bij een verandering in aanname. In paragraaf 9.2 zijn enkele gedachten opgeschreven die naar voren zijn gekomen naar aanleiding van de resultaten van dit onderzoek.

9.1 Aannames basisvariant

Binnen dit onderzoek is een basisvariant ontworpen, waarbij voor het ontwerp diverse aannames zijn gedaan. In deze paragraaf zijn de mogelijke consequenties hiervan beschreven. Hierbij is vooral gekeken naar het verwachte morfologische effect van het toepassen van een andere aanname dan in de basisvariant gedaan.

9.1.1 Wandslipvoorwaarde

Binnen dit onderzoek is ervoor gekozen om als wandslipvoorwaarde te kiezen voor no slip. Dit heeft als resultaat dat langs de oevers geen weerstand wordt ervaren, en de snelheid dus even hoog is als in het midden van de rivier. Voor een andere wandslipvoorwaarde, free slip, moesten de eddy viscositeit en eddy diffusiteit sterk verlaagd worden vanwege errors bij het simuleren. Er is daarom niet voor deze voorwaarde gekozen, maar in deze paragraaf is wel het effect ervan besproken.

Free slip zorgt ervoor dat langs de oevers weerstand wordt ervaren. Dit leidt ertoe dat de stroomsnelheid langs de oevers lager liggen dan in het midden van de rivier. Langs de oevers zal dus ook minder sedimenttransport plaatsvinden. Omdat een nevengeul altijd verbonden is via de oever van de rivier, kan dus een vermindering van sedimentinstroom verwacht worden, ten opzicht van de situatie met no slip.

Anderzijds kan ook verwacht worden dat door no slip de oevers hoger liggen, omdat de snelheid daar lager is. En uit de simulaties met bovenstroomse bochten is gebleken dat een grotere bodemhoogte voor de instroomopening van de nevengeul leidt tot een grotere evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul. Het is lastig te voorspellen welk effect dominant is.

9.1.2 Dwarsprofiel hoofdgeul

Het dwarsprofiel van de basisvariant is een bakvorm: verticale oevers en een horizontale bodem. In werkelijkheid kan verwacht worden dat in het midden van de rivier de laagste bodemhoogte wordt gevonden, welke toeneemt richting de oevers. De hoogste snelheid zal daarom in het midden van de rivier worden gevonden. Langs de oevers kan dan dus een lagere snelheid verwacht worden. Dit zal dan leiden tot een lagere sedimentinstroom richting de nevengeul.

Toch hoeft dit in dit geval niet te leiden tot een lagere evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul (tov de basisvariant). Immers, door de verhoogde bodemhoogte langs de oevers in de hoofdgeul zal er ook minder debiet langs de oevers stromen. Hierdoor zal ook de debietonttrekking van de nevengeul niet zo sterk oplopen als in de basisvariant het geval is. Het is lastig te voorspellen of de combinatie van beide effecten leidt tot een verhoging/verlaging van de evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul. Wel kan worden gesteld dat beide effecten tegengesteld zijn, en het gecombineerde effect dus minder extreem als beide samen.

Een andere gedachte die hierbij opkomt, is dat uit de simulaties met bovenstroomse bochten sterk afhankelijk waren van de bodemhoogte bij de instroomopening. In het geval van een realistisch dwarsprofiel is deze hoger dan met een bakvorm, en zou dus een hogere evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul verwacht worden. Dat zou dus betekenen dat de verlaging van debietonttrekking dominant is over de verlaging van sedimentinstroom.

Er wordt in ieder geval aanbevolen om hier vervolg-onderzoek naar te verrichten.

9.1.3 Uiterwaardstroming

De basisvariant is doorgerekend met een constante afvoer van $2000\text{m}^3/\text{s}$. Bij dit debiet stroomt de uiterwaard niet mee. Tevens is het rooster hier zo ontworpen dat de uiterwaard ook niet mee kan stromen. Het is echter goed mogelijk om een rooster te construeren dat wel rekening houdt met uiterwaardstroming.

Er wordt echter verwacht dat de invloed van uiterwaardstroming op de evenwichtsbodemhoogte zeer beperkt is. De periode van hoogwater, wanneer uiterwaardstroming optreedt, is namelijk erg kort ten opzichte van de tijdschalen waarop morfologische veranderingen plaatsvinden. Kleinhans et al. (2008) geven aan dat tijdens de hoogwaters een drempel ontstaat voor beide geulen. Direct na het hoogwater spoelt deze echter weg, en het gezamenlijke effect is verwaarloosbaar. Deze combinatie van sedimentatie tijdens hoogwater, en direct daarop erosie, is ook waargenomen in de nevengeul Opijnen (Simons et al., 2000). In combinatie met het eerder genoemde feit dat hoogwaters relatief kort duren, wordt verwacht dat uiterwaardstroming slechts een beperkt effect op de evenwichtsbodemhoogte kan hebben.

9.1.4 Kleilagen

Binnen dit onderzoek is niet gewerkt met kleilagen, terwijl deze in werkelijkheid wel kunnen voorkomen, zoals in de nevengeul Beneden-Leeuwen. Een kleilaag is cohesief, en erodeert daarom niet. Dat betekent dat bij zelfs in een situatie waarin de sedimentinstroom kleiner is dan de transportcapaciteit, er toch geen erosie optreedt.

Omdat er geen erosie (kan) optreden in de nevengeul, zal de debiet-onttrekking van de nevengeul niet toenemen in de tijd. Hierdoor kan verwacht worden dat de sedimentatie in de hoofdgeul beperkt zal blijven tot maximaal 20cm.

9.1.5 Hydrograaf

Binnen dit onderzoek is er gesimuleerd met een constante afvoer van $2000\text{m}^3/\text{s}$. In werkelijkheid is de afvoer niet constant, waardoor het mogelijk beter is om met een hydrograaf te werken. Het effect op het uiteindelijk evenwicht is lastig te voorspellen. Sowieso zal er dan geen 'statisch' evenwicht optreden (met een vaste bodemhoogte in de evenwichtssituatie), maar een dynamisch evenwicht. Door de steeds veranderende afvoer, verandert ook de snelheid en het sediment-transport. Hierdoor zal de simulatie steeds om een evenwicht heen bewegen, maar dit niet bereiken.

Het effect van een hydrograaf is veel sedimenttransport bij hoogwater, en weinig sedimenttransport tijdens normaal/laagwater. Op basis van metingen van de nevengeul bij Opijnen, kan verwacht worden dat tijdens hoogwaters sedimentatie optreedt in de nevengeul, en dat dit wegspoelt tijdens laagwaters. Het netto-effect bij de nevengeul Opijnen is zeer klein. In het onderzoek van Kleinhans et al. (2008) naar morfologische aspecten van splitsingen met een bovenstroomse bocht, wordt ook de cyclus van sedimentatie (tijdens hoogwater) en erosie (tijdens laagwater) waargenomen. Ze concluderen op basis van een vergelijking van simulaties met hydrograaf en een constante afvoer, dat het verschil bijna verwaarloosbaar is. Het wordt daarom verwacht dat een hydrograaf geen grote invloed heeft op de uiteindelijke bodemligging van hoofd- en nevengeul.

9.1.6 Kribben

Binnen dit onderzoek is er niet gewerkt met kribben. In werkelijkheid liggen deze over het grootste gedeelte van de Nederlandse rivieren. De verwachting is dat dit een grote invloed heeft op de uiteindelijke bodemligging van hoofd- en nevengeul, omdat de bifurcatiehoek hierdoor sterk kan toenemen.

Uit de simulaties met bifurcatiehoeken is gebleken dat een grotere bifurcatiehoek leidt tot een sterke beperking van de erosie (ten opzichte van de basisvariant). Er wordt bij een

kleinere bifurcatiehoek namelijk veel debiet richting de nevengeul geleid. Bij de basisvariant is gebleken dat deze hoeveelheid groter is dan de afvoercapaciteit van de nevengeul. Dit leidt dan tot erosie, totdat de afvoercapaciteit zodanig is toegenomen dat het debiet kan worden afgevoerd. Bij een grotere bifurcatiehoek, is de hoeveelheid debiet die richting de nevengeul wordt geleid kleiner, en zal de afvoercapaciteit dus niet zo sterk hoeven toe te nemen. Een verandering in bifurcatiehoek van $4,5^\circ$ naar $16,6^\circ$ levert een verschil op in bodemligging in de nevengeul van 85cm.

Door de instroomopening van de nevengeul in een kribvak te ontwerpen, kan de bifurcatiehoek oplopen tot richting de 90° . Aangezien een grotere bifurcatiehoek kan leiden tot sterke toename van de bodemhoogte in de nevengeul, kan dus een hogere bodemhoogte in de nevengeul verwacht worden. Verwacht kan worden dat de sedimentatie in de hoofdgeul dan ook minder sterk is.

9.1.7 Sedimentvang

Het ontwerp van de basisvariant bevat geen sedimentvang. Het is echter wel mogelijk om een ontwerp van een nevengeul te maken waarin deze is opgenomen. Hierdoor wordt de morfologische activiteit van een nevengeul sterk beperkt.

Een sedimentvang bij het begin van de nevengeul leidt ertoe dat er weinig sediment de nevengeul instroomt. Dit zou zelfs kunnen leiden tot erosie in de nevengeul, wanneer de transportcapaciteit van de nevengeul groter is dan het sedimenttransport dat voorbij de sedimentvang stroomt.

9.1.8 Nevengeul aantakken in een bocht

Binnen dit onderzoek is bekeken wat de invloed is van een bovenstroomse bocht. Hierbij is de nevengeul aangetakt benedenstrooms van de bocht. Het is natuurlijk ook mogelijk om een nevengeul in de bocht aan te takken, of zelfs voor de bocht.

Bij het aantakken van een nevengeul in een bocht, kan verwacht worden dat de hoogte van de instroomopening een sterke invloed heeft op de bodemhoogte van de nevengeul. Dit bleek namelijk ook bij de aantakking na een bovenstroomse bocht het geval te zijn. Verwacht kan worden dat de aantakking in een binnenbocht dan zal leiden tot een hogere bodemhoogte, en aantakking in een buitenbocht tot een lagere bodemhoogte van de nevengeul.

Bij het aantakken van een nevengeul voor een bocht, spelen andere aspecten een rol. Verwacht kan worden dat de bodemhoogte van de instroomopening dan niet beïnvloed wordt door de bocht, en dit dus niet meespeelt bij de uiteindelijke bodemhoogte van de nevengeul. Wel is de relatieve nevengeullengte dan van invloed op de bodemhoogte. Een nevengeul in de binnenbocht zal korter zijn dan de hoofdgeul, wat een hoge snelheid in de nevengeul veroorzaakt. Hierdoor kan een lagere bodemhoogte in de nevengeul verwacht worden. Een nevengeul in de buitenbocht heeft een langere lengte dan de hoofdgeul, en dus kan een hogere bodemhoogte verwacht worden in de nevengeul.

9.2 Overig discussiepunten

In deze paragraaf staan enkele discussiepunten beschreven op basis van de resultaten van dit onderzoek. Zo wordt ingegaan op het verschil tussen de nevengeul die binnen deze studie is onderzocht, en bestaande nevengeulen (9.2.1). In paragraaf 9.2.2 is ingegaan op de huidige ontwerprichtlijnen. Hierin is een nieuwe benadering van morfologische gedrag van nevengeulen voorgesteld. In navolging van deze benadering is in paragraaf 9.2.3 voorspeld wat het effect is van een nevengeul op evenwichtshoogte aan te leggen. Paragraaf 9.2.4 beschrijft de verwachte morfologische effecten van een eenzijdig aangetakte nevengeul. Hierbij stromen nevengeul niet het hele jaar mee, zoals binnen deze studie, maar slechts een gedeelte van het jaar. De laatste paragraaf (9.2.5) beschrijft hoe een nevengeul optimaal kan worden aangelegd. Hierbij wordt met 'optimaal' een situatie bedoeld waarbij de onderhoudskosten beperkt blijven. Belangrijkste aanbeveling in

dat geval is een eenzijdig aangetakte nevengeul te ontwerpen.

9.2.1 Vergelijking met praktijk

Een discussiepunt is in hoeverre de nevengeulen die ontworpen zijn binnen dit onderzoek representatief zijn voor bestaande nevengeulen, of nevengeulen die nog aangelegd moeten worden.

Wordt er puur gekeken naar de resulterende bodemligging van de nevengeul, dan valt op dat er sterke erosie is waargenomen binnen dit onderzoek. Bij bestaande nevengeulen die gemonitord zijn is dit niet het geval, deze blijven meer op hoogte. De huidige ontwerprichtlijnen voor nevengeulen zijn er ook op gericht dat er (lichte) sedimentatie optreedt. De uiteindelijke bodemhoogte in de nevengeul van dit onderzoek verschilt dus met de praktijk.

Het wordt verwacht dat de het verschil grotendeels wordt veroorzaakt doordat de bifurcatiehoek vrij klein is gekozen binnen dit onderzoek. Hierdoor wordt er veel debiet richting de nevengeul geleid, terwijl de afvoercapaciteit van de nevengeul hiervoor te klein is. In werkelijkheid zal de bifurcatiehoek waarschijnlijk groter zijn dan in de basisvariant, omdat de instroomopening tussen kribben zal liggen. Hierdoor wordt er minder debiet richting de nevengeul geleid, en deze zal daarop waarschijnlijk minder eroderen. Een aanbeveling is om het effect van kribben nabij de instroomopening op de evenwichtssituatie te onderzoeken.

Enkele andere verschillen met nevengeulen uit de huidige praktijk, zijn de aanwezigheid van een kleilaag (Beneden-Leeuwen) of een zeer kleine debiet-onttrekking (1% in plaats van 3%, Opijnen). Dit verschil met de praktijk draagt ook bij aan het relatief lagere bodemligging van de nevengeul binnen dit onderzoek.

9.2.2 Nieuwe ontwerprichtlijnen: evenwichtsbenadering

De huidige kijk op morfologische activiteit van nevengeulen is sterk gericht op morfologisch gedrag (sedimentatie/erosie). Zo zijn de ontwerprichtlijnen van nevengeulen gericht op (lichte) sedimentatie. Richtlijnen voor sedimentbeheer van nevengeulen zijn er dan weer op gericht dit zoveel mogelijk te voorkomen.

Uit dit onderzoek blijkt echter dat er veel beter gestreefd kan worden naar een benadering van evenwichtsbodemhoogtes. Morfologisch gedrag (erosie/sedimentatie) gaat immers niet continu door, maar is de tussenfase naar een nieuw evenwicht. Er kan in de toekomst dus beter gekeken worden naar evenwichtshoogtes.

Ook kan opgemerkt worden dat het niet noodzakelijk is dat nevengeulen op (lichte) sedimentatie worden ontworpen. Deze richtlijn is namelijk opgesteld omdat de verwachting bestond dat een eroderende nevengeul mogelijk continu bleef eroderen. Dit is echter een typische 1D reactie van instabiliteit, welke in 2D niet gereproduceerd is. Het is dan ook te verwachten dat deze reactie in werkelijkheid niet zal voorkomen. Daarmee is de richtlijn van (lichte) sedimentatie niet meer noodzakelijk.

Wel moet worden gesteld dat als de bodemhoogte van de nevengeul zodanig toeneemt dat er meer dan 3% van het debiet in de hoofdgeul wordt afgevoerd, dit tot sterkere sedimentatie in de hoofdgeul zal leiden. In verband met scheepvaart is het daarom wel van belang dat de evenwichtsbodemhoogte van de nevengeul niet te groot wordt. Ook betekent een toename in debiet-onttrekking van de nevengeul een toename van het verhang in de hoofdgeul ter plaatse van de hoofdgeul. En deze toename in verhang leidt tot een toename van de waterstand in de uiteindelijke evenwichtssituatie, wat analytisch is uitgewerkt in bijlage VII. Dit is ongewenst voor nevengeulen met als doelstelling waterstandsverlaging. Bij ontwerprichtlijnen gebaseerd op een evenwichtsbenadering zal dit inzichtelijk worden, terwijl bij de huidige richtlijnen dit niet naar voren komt.

9.2.3 Nevengeul op evenwichtshoogte

In deze paragraaf staat beschreven wat er gebeurt als de nevengeul op evenwichtsbodemhoogte wordt aangelegd. Dit is een aanvulling op de vorige paragraaf over de benadering van evenwicht in plaats van sturing op morfologisch gedrag.

Wanneer een nevengeul op evenwichtshoogte wordt aangelegd, dan zal er nauwelijks verandering in bodemhoogte van de nevengeul plaatsvinden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat in de Nederlandse rivieren geen constante afvoer optreedt, dus dat er verwacht kan worden dat hoofd- en nevengeul rondom een evenwicht bewegen, zoals al eerder beschreven in paragraaf 9.1.5. Hoewel verwacht kan worden dat de bodemhoogte in de nevengeul nauwelijks verandert, kan wel sedimentatie in de hoofdgeul worden verwacht. Als vuistregel wordt 20cm verzanding in de hoofdgeul aangehouden voor 3% debietonttrekking van de nevengeul. Bij een grotere debiet-onttrekking door de nevengeul kan uiteraard meer sedimentatie verwacht worden.

9.2.4 Eenzijdig aangetakte nevengeulen

Binnen dit onderzoek zijn meestromende nevengeulen onderzocht. Het is echter ook mogelijk om nevengeulen eenzijdig aan te takken. Hierdoor stromen ze slechts beperkt mee: alleen tijdens hoogwaters wanneer de uiterwaard meestroomt. De morfologische reactie van een eenzijdig aangetakte nevengeul is lastig te voorspellen. De volgende gedachten zijn er over mogelijk.

De nevengeul stroomt slechts een (zeer) korte tijd mee per jaar, dus de veranderingen die optreden in de nevengeul zijn klein. Anderzijds is bekend dat juist bij hoogwater sedimentatie ontwikkeld in de nevengeul. Daarop gebaseerd zal de nevengeul op de lange termijn steeds verder verzanden. Uit onderzoek naar de nevengeul Opijnen spoelt dit sediment echter na een hoogwater weer weg. Het netto-effect is dan dus klein. Een andere gedachte is dat de morfologische reactie sterk afhangt van de ligging van de nevengeul. Ligt de nevengeul dwars op de stroming in de uiterwaard, dan kan sedimentatie verwacht worden. Is de nevengeul echter gelegen parallel aan de stroombanen in de uiterwaard, dan kan erosie worden verwacht. Het is dus lastig een eenduidig effect te voorspellen. Wel wordt verwacht dat de morfologische reactie traag verloopt, omdat de nevengeul slechts een korte tijd per jaar meestroomt.

De verwachting is dat een eenzijdig aangetakte nevengeul een positief effect heeft op het morfologische gedrag in de hoofdgeul. Gedurende het grootste deel van het jaar is er namelijk geen debiet-onttrekking in de hoofdgeul. De bodemhoogte in de hoofdgeul zal zich dus richting de 'normale' evenwichtsbodemhoogte bewegen, gelijk aan de situatie zonder nevengeul. Alleen tijdens hoogwaters ervaart de hoofdgeul een debiet-onttrekking, waardoor enige sedimentatie kan worden verwacht. Het kan echter verwacht worden dat deze sedimentatie na het hoogwater, wanneer de nevengeul niet meer meestroomt, weer wegspoelt. Dat betekent dat de bodemligging van de hoofdgeul het grootste deel van de tijd nabij de oorspronkelijke bodemhoogte ligt. Het wordt dan ook verwacht dat er geen waterstandsverhoging optreedt op de lange termijn, zoals wel is aangetoond voor meestromende nevengeul binnen dit onderzoek.

Hoewel deze geulen dan voor waterstandsverlaging op de lange termijn effectiever zijn, is dit vanuit ecologisch oogpunt minder gewenst. Voor ecologische doeleinden is het gewenst dat in de nevengeul enige snelheid is, wat bij een eenzijdig aangetakte nevengeul niet het geval is.

9.2.5 Het optimale nevengeulontwerp

Het is binnen dit onderzoek niet gelukt alle relevante parameters te onderzoeken die invloed (kunnen) hebben op het morfologische gedrag van hoofd- en nevengeul. Toch kan er wel met enige voorzichtigheid het een en ander kwalitatief gezegd worden over een optimaal ontwerp van een nevengeul. Hierbij wordt uitgegaan van een situatie waarbij

initieel de nevengeul 3% van het debiet van de hoofdgeul onttrekt.

Een belangrijke keuze is de nevengeul permanent meestromend te ontwerpen, of beperkt meestromend (alleen tijdens hoogwaters). Het eerste is optimaal voor ecologische doelen, en is binnen deze studie onderzocht. Kijkend naar de morfologische ontwikkeling van de nevengeul dan is het mogelijk deze zodanig te ontwerpen dat een morfologische reactie beperkt blijft. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door een grotere bifurcatiehoek, en aanleg benedenstrooms van een bocht, zodanig dat er voor de instroomopening van de nevengeul verhoogd ligt. Hierbij is de verwachting dat de initiële bodemligging in de nevengeul ongeveer gelijk is aan de uiteindelijke bodemligging.

Bij een debiet-onttrekking van 3% kan in de hoofdgeul sedimentatie verwacht worden van ongeveer 20cm. Tevens blijkt dat de waterstandsverlaging bovenstrooms van de nevengeul verandert in een waterstandsverhoging in de uiteindelijke evenwichtssituatie. Zelfs na 4 jaar morfologisch rekenen is al lichte waterstandsverhoging waar te nemen. Er van uit gaande dat de nevengeul is ontworpen voor waterstandsverlaging, dan betekent dit dat er ten minste iedere vier jaar onderhoud moet plaatsvinden. Dit is dus duidelijk nog niet optimaal.

Een verhoging van de waterstand bovenstrooms zal altijd optreden wanneer een nevengeul permanent meestromend is. Wel kan de waterstandsverhoging beperkt blijven wanneer de debiet-onttrekking van de nevengeul beperkt is.

Een manier om waterstandsverhoging te voorkomen is de nevengeul niet permanent te laten meestromen. Tijdens normale afvoeren stroomt de nevengeul dan niet mee. Alleen tijdens hoogwaters zal de nevengeul meestromen, en dan kan verwacht worden dat deze zorgt voor een waterstandsverlaging. Tijdens deze korte periode kan enige sedimentatie in de hoofdgeul verwacht worden, maar deze zal gedurende de rest van het jaar waarschijnlijk wegspoelen. De verwachting is dus dat het onderhoud in de hoofdgeul zeer beperkt blijft. De morfologische reactie in de nevengeul is echter lastiger te voorspellen. Het zou kunnen dat nu hier meer onderhoud nodig is, maar het is ook mogelijk dat hier weinig onderhoud nodig is. Geadviseerd wordt om hier meer onderzoek naar te verrichten.

10 Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk beschrijft de conclusies die op basis van de verkregen resultaten zijn getrokken. Deze zijn teruggekoppeld aan de vijf onderzoeksvragen die in hoofdstuk 1 zijn gesteld. Tevens zijn er aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

10.1 Conclusies

In deze paragraaf staan de conclusies van dit onderzoek geschreven. Deze zijn gerelateerd aan de onderzoeksvragen die in de inleiding zijn gesteld.

In hoeverre is Delft3D geschikt om nevengeulen te modelleren?

Er kan geconcludeerd worden dat Delft3D in staat is om nevengeulen morfologisch te modelleren. De meeste processen die het morfologische gedrag van nevengeulen beïnvloeden, worden gesimuleerd in het Delft3D-model. Door het ontwerp van het rooster binnen dit onderzoek, was het niet mogelijk om te werken met uiterwaardstroming. Het is echter wel mogelijk binnen Delft3D om een ander rooster te ontwerpen, dat hier wel mee kan werken.

Het blijkt dat Meyer-Peter-Mueller minder geschikt is voor het modelleren van nevengeulen vanwege de kritieke Shields-factor die wordt meegenomen. Hierdoor is er onder een bepaalde snelheid geen sediment-transport meer. Het blijkt dat de snelheid in de nevengeul dicht bij deze snelheid ligt, wat grote invloed heeft op het resultaat. Engelund&Hansen gebruikt deze Shields-factor niet, en is hier dus niet gevoelig voor.

Wat is de morfologische en hydraulische ontwikkeling van hoofd- en nevengeul op de korte en lange termijn?

Het 2D-patroon in de hoofdgeul laat zien dat er na aanleg van de nevengeul alternerende banken ontstaan benedenstrooms van de nevengeul. Het ontstaan van deze banken wordt door de nevengeul getriggerd. De alternerende banken migreren in de eerste periode naar benedenstrooms, en worden daarna vervangen door vaste banken. De hoogte van de alternerende banken is initieel 25cm, en de hoogte van de vaste banken is 10cm.

In de hoofdgeul ontstaat een erosiekuil direct benedenstroom van de nevengeul. Na 1 jaar begint deze zich naar benedenstrooms te migreren. Na 4 jaar is de erosiekuil uit het domein gemigreerd, waarbij het 4,25km heeft afgelegd. Na 15 jaar treden er geen veranderingen in bodemhoogte op in hoofd- of nevengeul, er is dan dus evenwicht opgetreden.

Een breedte-gemiddelde analyse van de resultaten laat zien dat er drie trajecten zijn te onderscheiden in het morfologische gedrag van de hoofdgeul. Wordt er gekeken naar de situatie in evenwicht (na 15 jaar), dan is bovenstrooms van de nevengeul lichte sedimentatie (8,7mm) te zien in de hoofdgeul. Ter hoogte van de nevengeul ontstaat sterke sedimentatie (44cm) in de hoofdgeul en een verhoging van het verhang. Benedenstrooms is de bodemhoogte in de hoofdgeul gelijk aan de oorspronkelijke bodemhoogte. De initiële erosiekuil heeft hier dus geen invloed op.

De breedte-gemiddelde waterdiepte in de hoofdgeul laat zien dat direct na aanleg van de nevengeul de waterstand daalt (maximaal 9,2mm). Het blijkt echter dat na 4 jaar deze waterstandsverlaging is veranderd in een waterstandsverhoging. Dat betekent dat er binnen 4 jaar al onderhoud nodig is aan de hoofdgeul, omdat anders de doelstelling van het aanleggen van de nevengeul (waterstandsverlaging) niet wordt waargemaakt.

In de uiteindelijke evenwichtssituatie na 15 jaar (zonder enig onderhoud) is er een waterstandsverhoging in de hoofdgeul 8,7mm ten opzichte van de situatie zonder nevengeul. Er kan dus geconcludeerd worden dat een meestromende nevengeul op de lange termijn contraproductief is: in plaats van een waterstandsverlaging wordt een waterstandsverhoging in de hoofdgeul bereikt op de lange termijn.

Bij de basisvariant is de nevengeul initieel 3,5m hoger aangelegd dan de hoofdgeul. Er blijkt hier sterke erosie op te treden, wat ook leidt tot een sterke toename in het debiet door de nevengeul. Dit heeft voornamelijk met het ontwerp te maken (een kleine bifurcatiehoek), waarbij er meer debiet richting de nevengeul wordt geleid dan de afvoercapaciteit. De nevengeul past zich daarop aan door de afvoercapaciteit toe te laten nemen van 60m³/s tot 175m³/s. Bij het in kaart brengen van individuele parameters is gebleken dat het wel mogelijk is om een nevengeul minder sterk te laten eroderen door de nevengeul anders te ontwerpen.

Het blijkt dat zowel nevengeul als hoofdgeul altijd openblijven, en niet volledig dicht sedimenteren. Hierbij kan in de hoofdgeul altijd verzanding worden verwacht, door de debiet-onttrekking van de nevengeul. De bodemhoogte in de nevengeul is variabel, en afhankelijk van het ontwerp. Wel blijkt de bodemhoogte van beide geulen van elkaar af te hangen. Hierbij hoort een lage bodemhoogte in de nevengeul bij een sterke sedimentatie van de hoofdgeul, en kleine sedimentatie in de hoofdgeul bij een hoge bodemhoogte van de nevengeul.

Wat is de invloed van individuele parameters op de morfologische ontwikkeling?

Binnen dit onderzoek zijn diverse parameters onderzocht. Hiervan bleken twee een redelijke invloed te hebben op het uiteindelijke evenwicht, dit waren een bovenstroomse bocht en de bifurcatiehoek. Bij de bovenstroomse bocht bleek de bodemhoogte van de nevengeul niet zozeer af te hangen van de grootte van de bocht, of het type bocht (binnenbocht of buitenbocht). De bodemhoogte voor de instroomopening bleek de bodemhoogte van de nevengeul te beïnvloeden. Was de bodemhoogte van de instroomopening groot (door de aanwezigheid van de bocht), dan stroomde er meer sediment richting de nevengeul. Hierdoor nam de bodemhoogte in de nevengeul toe. Was de bodemhoogte van de instroomopening daarentegen laag, dan stroomde er minder sediment richting de nevengeul. Hierdoor nam de bodemhoogte in de nevengeul af.

De andere parameter die invloed bleek te hebben op de bodemhoogte in de nevengeul is de bifurcatiehoek. Dit kan verklaard worden door de hoeveelheid debiet die richting de nevengeul wordt geleid te vergelijken met de afvoercapaciteit van de nevengeul. De afvoercapaciteit van de nevengeul is ontworpen op 3% van het debiet in de hoofdgeul. Bij een kleine bifurcatiehoek zal er meer debiet richting de nevengeul dan de afvoercapaciteit, waardoor de afvoercapaciteit sterk zal toenemen. Anderzijds leidt een grotere bifurcatiehoek tot een beperking van het debiet dat richting de nevengeul wordt geleid. Hierdoor hoeft de afvoercapaciteit minder toe te nemen, en dus blijkt de uiteindelijke bodemhoogte in de nevengeul groter te zijn.

De andere parameters die zijn getest blijken weinig tot geen invloed te hebben op de bodemhoogte in de nevengeul. Hierbij is gekeken naar parameters voor dwarsshellingen en spiraalstroming en de sedimentgrootte.

Voldoen de huidige ontwerprichtlijnen voor nevengeulen?

De huidige ontwerprichtlijnen zijn gericht op lichte sedimentatie in de nevengeul. Erosie in de nevengeul wordt gevreesd, omdat het mogelijk wordt geacht dat een eroderende nevengeul niet meer stopt met eroderen. Dit zou dan grote consequenties hebben voor onderhoud. Er kan echter geconcludeerd worden dat continue erosie niet verwacht wordt in nevengeulen. Dit is een typische 1D-reactie van instabiliteit, die in 2D niet

gereproduceerd kon worden.

De benadering van sedimentatie of erosie door de ontwerprichtlijnen wordt niet gesteund door de resultaten van dit onderzoek. Sedimentatie of erosie treedt alleen tijdelijk op, omdat de bodemhoogte van hoofd- en nevengeul zich naar een nieuw evenwicht beweegt. Een betere benadering is te kijken naar deze uiteindelijke evenwichtsbodemhoogtes. Wanneer er op deze aspecten wordt gestuurd, dan kan sedimentatie of erosie zelfs worden toegestaan.

Hoe verhouden de resultaten van dit onderzoek zich met eerder onderzoek?

De morfologische en hydraulische reactie van de hoofdgeul in dit 2D onderzoek is kwalitatief gelijk aan de reactie van de hoofdgeul van een analytische evenwichtsstudie (Ribberink, 2006). Kwantitatief zijn er wel verschillen, omdat in de analytische studie de nevengeul geen sediment onttrekt uit de hoofdgeul, maar alleen debiet. Er stroomt daarom in 2D minder sediment door de hoofdgeul, waardoor de morfologische reactie in de hoofdgeul ook beperkter is dan de analytische reactie. Tevens wordt in analytische studies geen rekening gehouden met morfologisch gedrag van de nevengeul, terwijl dit wel optreedt.

De resultaten van dit onderzoek zijn ook vergeleken met eerder 1D onderzoek in SOBEK door Klop (2009). Hierin wordt de verhouding van specifiek sedimenttransport over hoofd- en nevengeul bepaald door de verhouding van specifieke debiet over beide geulen tot een bepaalde macht. Deze macht in de splitsingspuntrelatie wordt in 1D onderzoek als constant veronderstelt. Uit dit 2D onderzoek blijkt echter dat de macht in de splitsingspuntrelatie niet constant is in de tijd. Dat betekent dus dat het sedimenttransport door de tijd heen niet juist wordt verdeeld over hoofd- en nevengeul in 1D onderzoek. Kwalitatief kan hierover worden gezegd dat de 1D morfologische reactie trager verloopt dan de 2D reactie.

Wanneer hoofd- en nevengeul in evenwicht zijn (morfologisch gezien), verandert ook de waarde van de macht in de splitsingspuntrelatie niet meer. Dit betekent dat de macht in de splitsingspuntrelatie zich in de tijd naar een evenwichtswaarde beweegt. Deze waarde is onafhankelijk van de initiële aanleghoogte van de nevengeul.

Een belangrijk resultaat uit 1D onderzoek is dat voor een kleine waarde van de macht in de splitsingspuntrelatie ($< n/3$, waarbij n de macht van de sediment transport formule is), altijd instabiliteit optreedt (Wang et al. 1995). Volgens Klop (2009) kan de nevengeul dan binnen 10 jaar volledig sedimenteren. Op basis van dit 2D onderzoek kan echter geconcludeerd worden dat bij deze conditie geen instabiliteit optreedt bij 2D-simulaties. Zo zijn er diverse simulaties geweest waarbij de uiteindelijke (evenwichtswaarde van de) macht in de splitsingspuntrelatie kleiner is dan $n/3$, maar dit heeft in geen enkel geval geleid tot volledige verzanding van de nevengeul. Zelfs bij simulaties waarbij gedurende het grootste deel van de tijd deze conditie optrad, heeft er geen volledige verzanding plaatsgevonden. Er kan dus geconcludeerd worden dat dit een typisch 1D reactie is, die niet in 2D kan worden gereproduceerd.

Wordt er gekeken naar waarden van de macht van de splitsingspuntrelatie groter dan $n/3$, dan blijkt de relatie tussen de macht van de splitsingspuntrelatie en de evenwichtswaterdiepte kwalitatief overeen te komen tussen 1D en 2D onderzoek. Kwantitatief zijn er wel verschillen, maar dit ligt aan de verschillende ontwerpen van nevengeul tussen dit onderzoek en die van Klop (2009). Zo is bij Klop (2009) bijvoorbeeld de nevengeullengte veel groter, wat zorgt voor een lagere stroomsnelheid. Dit beïnvloed natuurlijk het morfologische gedrag.

Samengevat, blijkt dus dat de macht in de splitsingspuntrelatie niet constant is (onjuiste 1D aanname), dat voor waarden van deze macht kleiner dan $n/3$ geen instabiliteit optreedt (onjuiste 1D voorspelling), en dat de morfologische reactie in 1D trager verloopt dan in 2D. Er wordt daarom geconcludeerd dat meestromende nevengeulen voortaan beter in 2D gemodelleerd kunnen worden.

10.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten en conclusies van dit onderzoek, worden meerdere aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

De eerste aanbeveling is dat er meer ontwerpelementen/parameters onderzocht moeten worden. Hierbij is de verwachting dat het toevoegen van kribben het morfologische gedrag sterk zal beïnvloeden. Andere parameters die onderzocht dienen te worden zijn: een vaste bodem bij de in- en/of uitstroomopening, cohesieve bodem, sedimentvang, realistisch dwarsverhang. En de ontwerpparameters van de nevengeul: breedte, lengte, Chezy-waarde. Ook verdient het aanbeveling meer onderzoek naar bovenstroomse bochten, en dan specifiek naar het effect van breedte-diepte verhouding, en locatie van de instroomopening (voor, in of na de bocht). Verder is het ook interessant om de invloed van variabele afvoer in kaart te brengen. Hierbij zal er ook uiterwaarstroming optreden, wat binnen dit onderzoek geheel buiten beschouwing is gelaten.

Een tweede aanbeveling is een bestaande nevengeul te modelleren. Dan kan onderzocht worden in hoeverre de modelresultaten stroken met de praktijk. Er wordt aanbevolen om hiervoor de nevengeul in de Bakenhof bij Arnhem te onderzoeken. Deze geul heeft een uniforme breedte, wat het modelleren eenvoudiger maakt. Het verdient dan ook aanbeveling deze nevengeul morfologisch te monitoren, zodat er praktijkdata is om te vergelijken.

Een derde aanbeveling is om ook onderzoek te verrichten naar de morfologische effecten van eenzijdig aangetakte nevengeulen. Het is namelijk verwacht dat de sedimentatie in de hoofdgeul hierdoor sterk wordt beperkt, waardoor onderhoudskosten beperkt worden. Het lijkt daarom een effectieve manier om waterstandsverlaging op de lange termijn te creëren. Het morfologische gedrag in de nevengeul is lastiger te voorspellen, hiervoor is nader onderzoek gewenst.

Als laatste wordt aanbevolen om Delft3D op enkele punten aan te passen, zodat de problemen die binnen dit onderzoek zijn ontdekt, voortaan niet meer optreden. Een van de problemen is dat er verstoringen ontstaan op domeinranden (bij domein-decompositie), wanneer sediment in de richting van aflopende roosternummers stroomt. Een ander probleem was dat benedenstroomse vergroving (N-1 koppeling) niet goed werkte, omdat het sediment niet in het benedenstroomse rooster stroomt.

Literatuurlijst

- Baptist, M. J., en Mosselman, E. (2002), *Biogeomorphological modelling of secondary channels in the Waal river*, paper presented at River flow 2002, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- De Heer, A. F. M. (2003), *Sedimentverdelingen bij splitsingen*, Technische Universiteit Delft.
- De Nooijer, J. J. (2006), *Invloed van een nevengeul op morfologie en sedimentverdeling bij een riviersplitsing*, Technische Universiteit Delft
- Deltares (2010), Delft3D FLOW user manual
- Gerritsen, H., en M. Schropp (2010), *Handreiking sedimentbeheer nevengeulen*, Rijkswaterstaat Waterdienst
- Hetzer (2005), *Navigability of the river Waal*, Universiteit Stuttgart
- Jans (2004), *Evaluatie nevengeulen Gamberensche Waard 1996-2002*, RIZA Lelystad
- Julien, P. Y., G. J. Klaassen, W. B. M. Ten Brinke, en A. W. E. Wilbers (2002), *Case Study: Bed Resistance of Rhine River during 1998 Flood*, Journal of hydraulic Engineering
- Kleinhans, M. G., Jagers, H. R. A. Mosselman, E. en Sloff, C. J. (2008), *Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models*, Water Resour. Res., 44(8)
- Klop, E. R. (2009), *Morfologische ontwikkelingen in nevengeulen: ontwerpparameters & sedimentbeheersende maatregelen*, Universiteit Twente.
- Kroekenstoel, D. (2009), *Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren*, Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester, en G. S. Stelling (2004), *Development and validation of three-dimensional morphological model*, Coastal Engineering, 51, 883-915.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007), *Leidraad Rivieren*, Drukkerij Ando bv, Den Haag
- Mosselman, E. (2001), *Morphological development of side channels*, T2401, WL|Delft Hydraulics
- Ottevanger, W., Yossef, M. (2006) *Voorspelinstrument duurzame vaarweg, Roosteruitbreiding met Beneden Merwede en Nieuwe Merwede*, Q4186, WL|Delft Hydraulics
- Peters, B. Kater, E. en Geerling (2006), *Cyclisch beheer in uiterwaarden*, Centrum voor water en samenleving, Radboud universiteit Nijmegen.
- Ribberink, J.S. (2006), *Transport Processes and Morphology*, Civiele Techniek en Management [CIT], Universiteit Twente
- Schielen, R., Doelman, A. en de Swart, H.E. (1993), *On the nonlinear dynamics of free bars in straight channels*, Journal of Fluid Mechanics 252
- Simons, J., Bakker, C., en Sorber, A. (2000), *Evaluatie nevengeulen Opijnen en Beneden-Leeuwen 1993-1998*, RIZA
- Sloff, C.J. (2001), *Morfologische studie BOS baggeren met Delft2D rivieren*, Q2844, WL|Delft Hydraulics
- Sloff, C.J., en Jagers, H.R.A. (2005), *2D morfologische berekeningen Lent*, MER dijkteruglegging Lent, Q3560, WL|Delft Hydraulics
- Ter Hoeven (2002), *Stochastische voorspelling van morfologische ontwikkelingen in de Waal*, Technische Universiteit Delft

- Van Breen (2002), *Morphological response to large-scale floodplain lowering along the river Waal*, Technische Universiteit Delft
- Van der Mark, C.F. (2004), *Sedimentverdeling bij riviersplitsingen*, Technische Universiteit Delft
- van Reen (2002), *Morfologische problemen rond bochtverbeteringen in de Waal*, Technische Universiteit Delft
- Wang, Z. B., de Vries, M., Fokkink, R. J. en Langerak, A. (1995), *Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models*, Journal of Hydraulic Research, 739-750.
- Wolters, H. A., M. Platteeuw, en M. M. Schoor (2001), *Richtlijnen voor inrichting en beheer uiterwaarden*, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Welsch (2002), *Assessment of Delft3D morphodynamic model during duck94*, Naval postgraduate school Monterey California
- Yossef, M., Stolker, C., Giri, S., Hauschild, A., en van Vuren, S. (2008), *Voorspelinstrument duurzame vaarweg, Calibration of the multi-domain model*, Q4370.20, WL|Delft Hydraulics

Bijlage I: $Q_{s, \text{cap}} \sim Q^{n/3}$

In deze bijlage is uitgewerkt dat de transportcapaciteit van een geul afhangt van het debiet door de geul tot de macht 'n/3'. Hierbij is n de macht in de sedimenttransportformule. De afleiding begint met de volgende drie vergelijkingen:

$$Q = uBh \quad (17)$$

$$u = C\sqrt{hi} \quad (18)$$

$$Q_s = Bmu^n \quad (19)$$

Vergelijking (17) wordt herschreven:

$$h = \frac{Q}{(uB)} \quad (20)$$

De hierdoor gevonden waterdiepte wordt in Vergelijking (18) geschreven:

$$u = C\sqrt{\frac{Q}{(uB)}}i \quad (21)$$

Beide zijden worden gekwadrateerd:

$$u^2 = C^2 \frac{Q}{(uB)}i \quad (22)$$

De snelheid (u) rechts wordt naar de linkerkant gebracht:

$$u^3 = C^2 \frac{Q}{B}i \quad (23)$$

Beide zijden tot de macht 1/3:

$$u = (C^2 \frac{Q}{B}i)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

De gevonden snelheid in Vergelijking (19) gebruiken:

$$Q_s = Bm((C^2 \frac{Q}{B}i)^{\frac{1}{3}})^n \quad (25)$$

Uitwerken van de machten aan de rechterzijde geeft:

$$Q_s = BmQ^{\frac{n}{3}}(C^2 \frac{1}{B}i)^{\frac{n}{3}} \quad (26)$$

Hieruit blijkt dat het sedimenttransport gerelateerd is aan het debiet tot de macht 'n/3'.
QED

Bijlage II: Resultaten met Meyer-Peter-Mueller

Binnen dit onderzoek is korte tijd met de sediment transport formule van Meyer-Peter-Mueller gewerkt. Het is echter gebleken dat de resultaten sterk afhankelijk bleken van de kritieke Shields-factor. Dit werd als ongewenst aanschouwt, waarop is gekozen om verder Engelund&Hansen te gebruiken. In deze bijlage staan enkele resultaten verkregen met Meyer-Peter-Mueller, om zo het effect van de kritieke Shields factor te tonen.

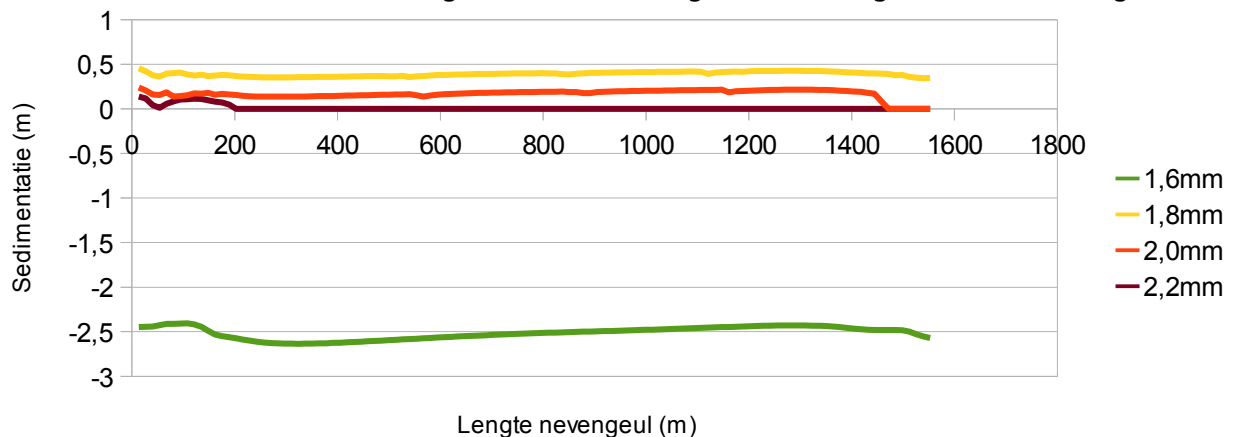
Het sediment transport wordt door Meyer-Peter-Mueller als volgt bepaald:

$$S = 8 \alpha \sqrt{g \Delta D_{50}^3} (\mu \theta - \xi \theta_{cr})^{1,5} \quad (1)$$

Waarbij

- α = calibratieparameter
- Δ = relatieve dichtheid ($\rho_s - \rho_w / \rho_w$)
- μ = factor voor ribbels
- θ = Shields parameter
- θ_{cr} = kritieke Shields parameter
- ξ = factor voor blootstelling en verberging van sediment

Het effect van de kritieke Shields factor is dat er onder een bepaalde snelheid geen sediment transport plaats vindt. Omdat is gebleken dat de snelheid in de nevengeul rondom deze waarde ligt, blijkt het resultaat hiervan sterk afhankelijk. Dit is in kaart gebracht door verschillende sedimentgroottes te bestuderen. Uit onderzoek met Engelund&Hansen blijkt de sedimentgrootte namelijk nauwelijks invloed te hebben op het morfologische gedrag. In Afbeelding 38 zijn de resultaten gepresenteerd. In de gedane simulaties is de initiële bodemhoogte van de nevengeul 3,5m hoger dan de hoofdgeul.



Afbeelding 38: Sedimentatie in de uiteindelijke evenwichtssituatie voor diverse sedimentgroottes.

Uit deze afbeelding lijkt het dat de sedimentgrootte een grote invloed heeft op de uiteindelijke bodemligging. Hierbij stroomt er nauwelijks sediment van $D_{50}=1,8\text{mm}$, terwijl bij $D_{50}=1,6\text{mm}$ het sediment wel in beweging komt. In dat laatste geval is de evenwichtsbodemhoogte in de nevengeul daarom veel lager dan bij de andere simulaties. Uit de analyse van Engelund & Hansen blijkt echter dat het sediment nauwelijks invloed heeft op de uiteindelijke bodemhoogte. Het effect uit Afbeelding 38 wordt voornamelijk veroorzaakt door de kritieke Shieldsfactor. Dat betekent dat bij het in kaart brengen van de invloed van parameters, voornamelijk de invloed van de kritieke Shieldsfactor in kaart wordt gebracht. Dit belemmert de analyse van individuele parameters, waarop is gekozen om verder te werken met Engelund & Hansen als sediment transport formule.

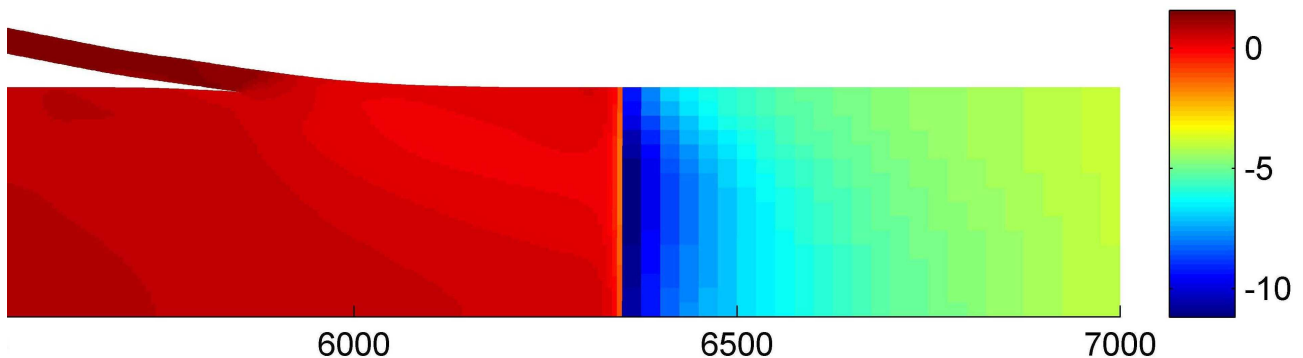
Bijlage III Problemen met Delft3D

Bij het simuleren van met Delft3D is er tegen enkele problemen aangelopen. In deze bijlage staan deze problemen beschreven.

III.1 Benedenstroomse vergroving

Binnen dit onderzoek is gewerkt met domein-decompositie. Hiermee kunnen meerdere roosters aan elkaar gekoppeld, en in 1 simulatie worden doorgerekend. Bij domein-decompositie is het verder ook mogelijk om sommige roosters fijner te maken dan andere. Zo kan bijvoorbeeld het gebied van interesse gedetailleerd worden berekend, en daarbuiten met een grover rooster.

Binnen dit onderzoek is gebleken dat het verfijnen van een rooster mogelijk is, zodat bovenstrooms met een grover rooster gerekend kan worden. Benedenstrooms van het interessegebied weer vergroven bleek echter niet goed te gaan. Hier ontstaat namelijk op de domeinrand sterke erosie op het benedenstroomse rooster, zie Afbeelding 39.



Afbeelding 39: Bodemhoogte na 8 jaar simuleren. De bovenstroomse roosters (links) zijn fijn, en aan een grof benedenstrooms roosters (rechts) gekoppeld. De sterke bodemhoogte verlaging ontstaat op 6400m, precies de domeinrand.

Het lijkt erop dat het sediment wel uit het fijne rooster stroomt (er treedt immers geen sterke sedimentatie op), maar niet in het grove rooster. Daarom wordt er op de modelrand veel (nieuw) sediment in beweging gebracht, waardoor daar sterke erosie optreedt. Er is daarom gekozen om bij de basisvariant het benedenstroomse rooster niet te vergroven, maar even fijn te houden als het rooster rondom de nevengeul.

III.2 No Slip

Binnen dit onderzoek is er gepoogd te werken met no slip. Hierbij ervaart de stroming weerstand langs de wanden (oevers). Wanneer deze conditie echter werd gebruikt, ontstonden er errors bij het simuleren. Deze gaven aan dat de eddy diffusiteit en eddy viscositeit te groot waren. Deze waren beide initieel ingesteld als 1. Beiden moesten een factor 100 kleiner gemaakt worden, voordat het Delft3D-model wilde simuleren. Deze waarde ligt ver van de gebruikelijke waarde. Tevens is mijn kennis van deze parameters klein, waardoor besloten is deze niet zodanig te verkleinen. Er is daarom verder gewerkt met 'free slip', waarbij geen weerstand langs de wanden wordt ervaren. Het verwachte effect van deze keuze is in de discussie beschreven.

III.3 Problemen met roosters

Gedurende het onderzoek zijn er enkele problemen met het Delft3D-rooster geweest. Zo is ontdekt dat bij domein-decompositie sediment niet goed door domeinranden heenstroomt wanneer het sediment in de richting van aflopende roosternummers stroomt. Dit geeft verstoringen op de domeinrand. Stroomt het sediment echter in de richting van oplopende roosternummers, dan stroomt het zonder verstoringen door de domeinranden. Dit is dan ook toegepast op het gebruikte rooster.

Gedurende het onderzoek zijn er diverse roosters getest, omdat het rooster ook invloed bleek te hebben op het morfologische gedrag. Hierbij was de veronderstelling dat het

probleem ontstond bij het splitsingspunt op de domeinrand. Hierop zijn diverse roosters ontworpen om dit op te lossen. Het bleek echter niet dat een splitsingspunt op een domeinrand het probleem was, maar dat de geteste rooster nog te grof waren. Er is daarom een convergentie analyse uitgevoerd, waaruit bleek dat het rooster 2x2 verfijnd moest worden. Dit is verder in het hoofdverslag beschreven in Hoofdstuk 6.

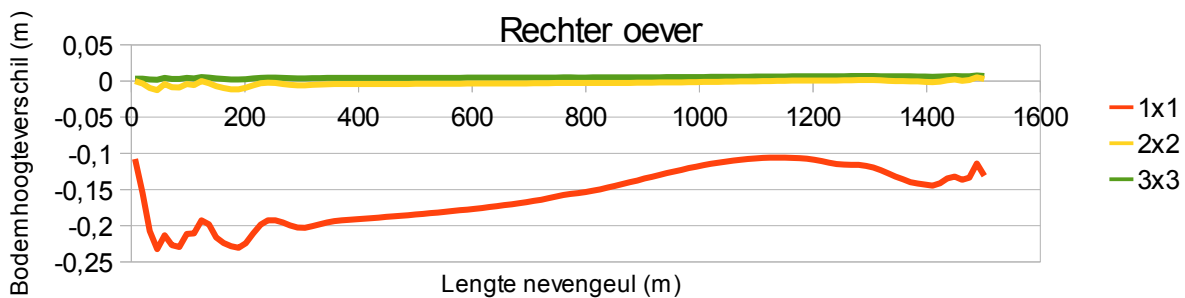
Bijlage IV: Bodemligging nevengeul

Bij het vergelijken van de roosterverfijningen, is alleen gekeken naar het breedte-gemiddelde resultaat. Dit kwam overeen voor rooster 2x2, 3x3 en 4x4, alleen rooster 1x1 week af. Het is echter ook interessant om te weten of de 2D resultaten ook overeenkomen. Hiervoor is de bodemhoogte van de vier rooster in kaart gebracht voor de linker- en rechter oever, en eveneens voor het linker- en rechtermidden, zie Afbeelding 40.

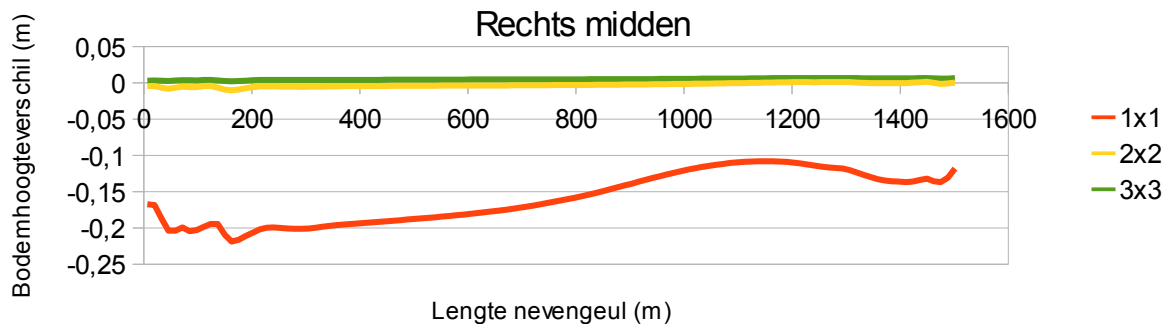


Afbeelding 40: Definitie bodemhoogtelijnen. Linkeroever is groen, rechteroever is bruin. Midden-links is blauw, en midden-rechts is roze.

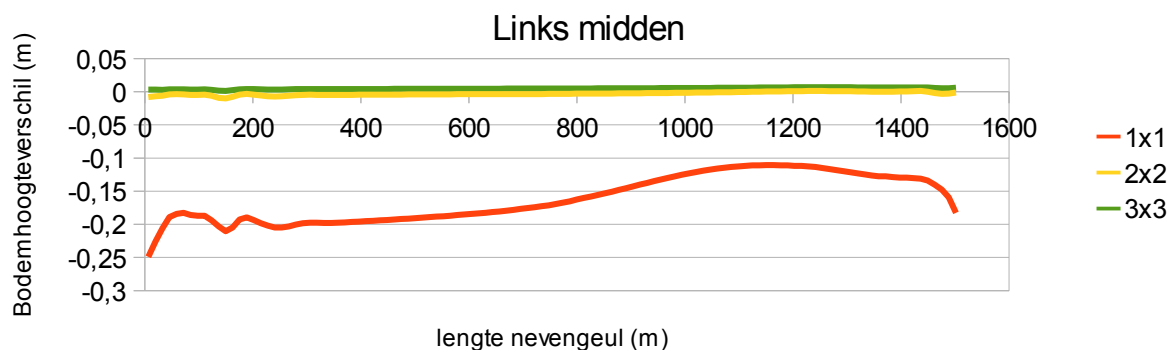
De resultaten van de verschillende roosters zijn hieronder weergegeven.



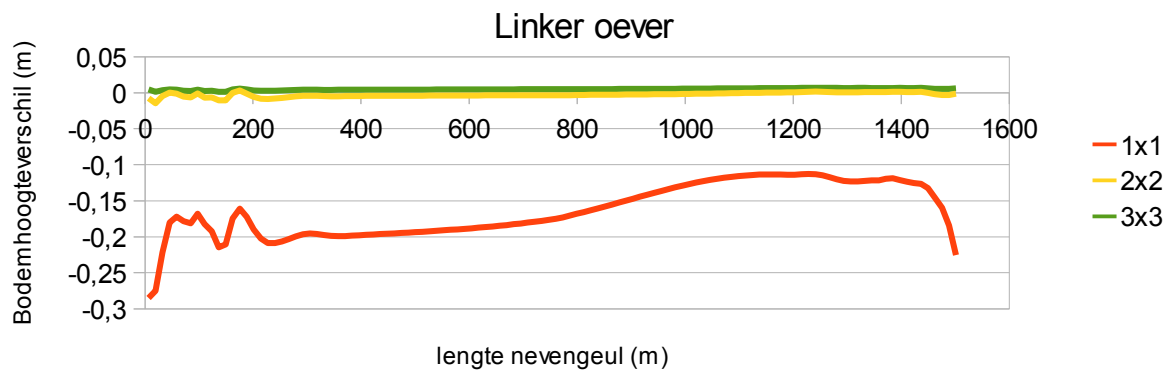
Afbeelding 41: Bodemhoogteverschil rechter oever ten opzichte van het 4x4 rooster.



Afbeelding 42: Bodemhoogteverschil rechts midden ten opzichte van het 4x4 rooster.



Afbeelding 43: Bodemhoogteverschil links midden ten opzichte van het 4x4 rooster.

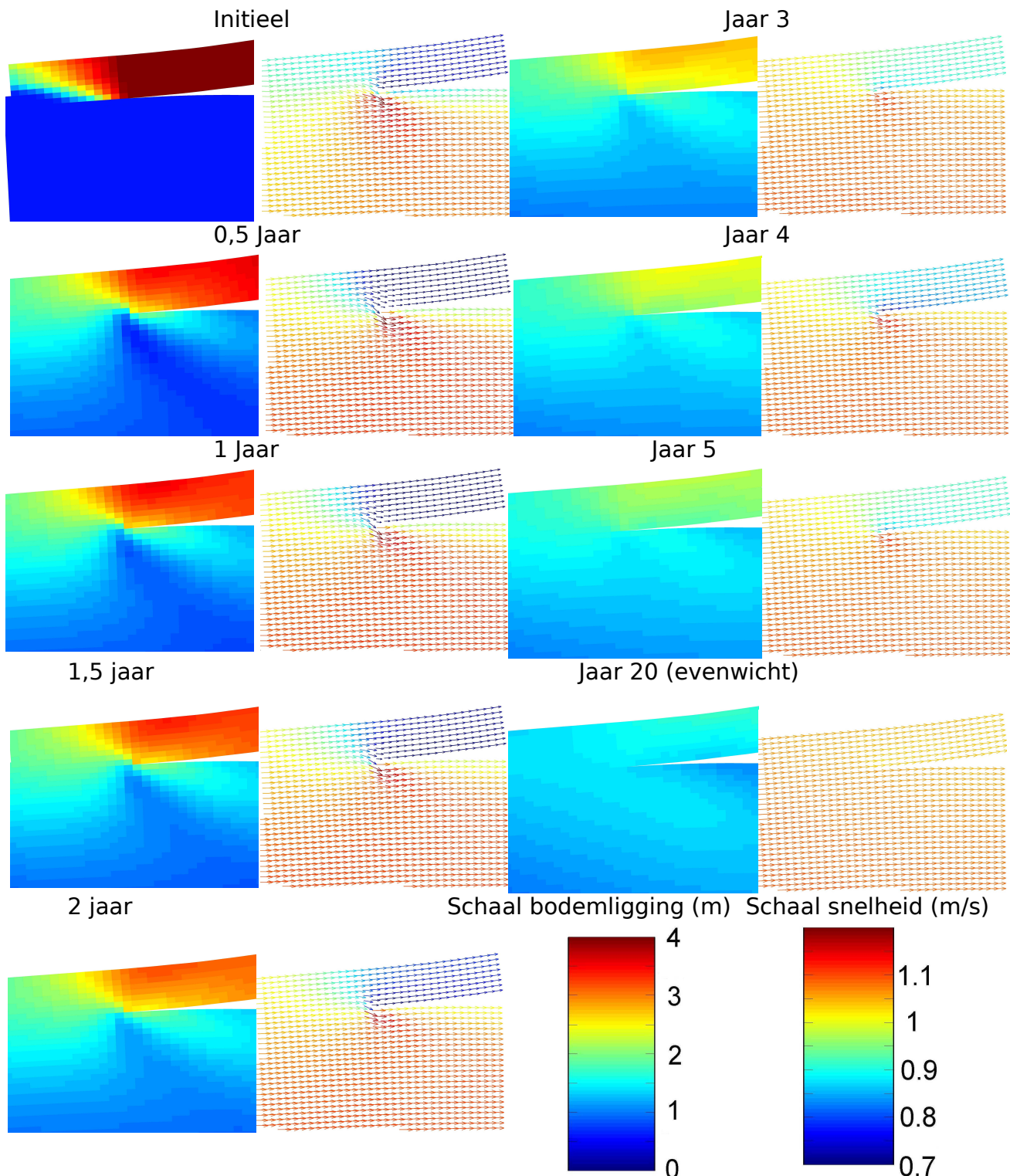


Afbeelding 44: Bodemhoogteverschil linker oever ten opzichte van het 4x4 rooster.

Uit alle vier de afbeeldingen blijkt dat het 1x1 rooster sterk afwijkt van de andere roosters. De andere 2 roosters (2x2 en 3x3) vertonen maar weinig bodemhoogteverschil met het 4x4 rooster. Er is daarom voor gekozen om met het 2x2 rooster verder te werken.

Bijlage V: Instroomopening in de tijd

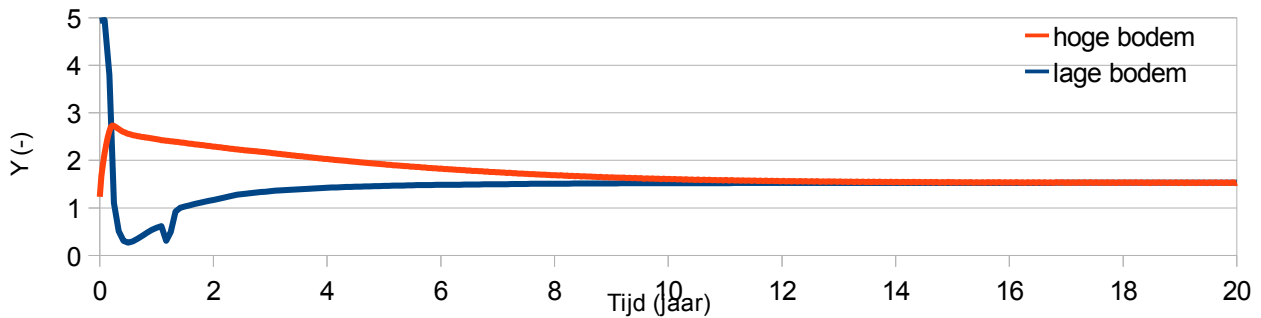
Deze bijlage laat in detail zien wat er gebeurt rondom de instroomopening wat betreft snelheidsvectoren en bodemhoogte. Initieel ontstaat een sterke stroming vanuit de nevengeul de hoofdgeul in. Dit wordt veroorzaakt door het gebrek aan afvoercapaciteit van de nevengeul en de vormgeving van de instroomopening die veel debiet richting de nevengeul stuurt. Gedurende de tijd neemt dit langzaam af, en in de evenwichtsituatie is afvoercapaciteit van de nevengeul sterk toegenomen. De sterke afbuiging van de stroming is dan ook verdwenen.



Bijlage VI: Eerder evenwicht in 2D tov 1D

In paragraaf 8.2 wordt beweerde dat in 2D evenwicht eerder bereikt wordt dan in 1D. In deze bijlage is deze bewering onderbouwd.

Het verschil tussen 1D en 2D wordt veroorzaakt door de macht in de splitsingspuntrelatie. Bij 1D onderzoek wordt deze als constant verondersteld, terwijl uit 2D onderzoek blijkt dat deze gedurende de tijd variabel is. Wel wordt er een evenwichtswaarde bereikt, wanneer de simulatie in evenwicht is. Dit is onafhankelijk van de aanleghoogte. De waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie is hieronder weergegeven voor een hoge, en lage aanleghoogte van de nevengeul.



Afbeelding 45: De waarde van de exponent van de splitsingspuntrelatie door de tijd. Zowel voor de basisvariant met de nevengeul op hoogte (+3,5m boven de hoofdgeul), als voor een situatie waarbij initieel de bodem-hoogte in de nevengeul gelijk is aan de hoofdgeul.

Het blijkt dat voor beide aanleghoogtes dezelfde evenwichtsbodemhoogte voor de nevengeul wordt gevonden. De hoge bodem heeft hiervoor erosie ondergaan, terwijl de lage bodem sedimentatie heeft ondergaan. Duidelijk te zien is dat in evenwicht ook dezelfde waarde van de macht van de splitsingspuntrelatie wordt bereikt. Wanneer er in 1D gerekend zou worden, zou deze evenwichtswaarde als (constante) invoer waarde worden gebruikt voor de macht van de splitsingspuntrelatie.

De splitsingspuntrelatie die in 1D gebruikt is, is van Wang et al. (1995), zie vergelijking (1). Deze kan herschreven worden, zodat het specifieke debiet aan het specifieke sedimenttransport wordt gerelateerd:

$$\frac{q_{s1}}{q_{s2}} = \left(\frac{q_1}{q_2} \right)^Y \quad (4)$$

Hierin staat de '1' voor de nevengeul, en '2' voor de hoofdgeul. In beide simulaties is het specifieke debiet in de nevengeul kleiner dan in de hoofdgeul ($q_1/q_2 < 1$).

Voor de situatie met erosie (hoge bodem) betekent dit:

de macht in de splitsingspuntrelatie is gedurende de simulatie groter in 2D, en kleiner in 1D (waar de evenwichtswaarde wordt gebruikt). In combinatie met het feit dat ($q_1/q_2 < 1$), leidt dit ertoe dat gedurende de simulatie q_{s1} in 2D kleiner is dan in 1D. 2D voorspelt dus een kleinere sedimentinstroom, waardoor de erosie in 2D sneller zal verlopen.

Voor de situatie met sedimentatie (lage bodem) betekent dit:

de macht in de splitsingspuntrelatie is gedurende de simulatie kleiner in 2D en groter in 1D. Dat leidt ertoe dat gedurende de simulatie q_{s1} groter is in 2D dan in 1D. In combinatie met het feit dat ($q_1/q_2 < 1$), betekent dit dat in 2D de sedimentinstroom groter is, wat betekent dat de sedimentatie sneller verloopt.

Dus zowel voor sedimentatie als erosie wordt zal het evenwicht eerder bereikt worden. De morfologische reactie verloopt in 2D dus sneller dan in 1D. Merk op dat dit alleen geldt als $q_1/q_2 < 1$.

Bijlage VII: Analytische evenwichtssituatie

In deze bijlage is analytisch gekeken naar het verband tussen de debiet-onttrekking en de toename van de waterstand in de hoofdgeul bovenstrooms van de nevengeul, op de lange termijn. Analytisch evenwichtsmorfologie beperkt zich tot het voorspellen van de bodemhoogtes in de evenwichtssituatie. Op welke wijze deze worden bereikt kan hiermee niet worden voorspeld. In deze bijlage wordt analytisch aangetoond dat debiet-onttrekking op de lange termijn altijd leidt tot waterstandsverhoging bovenstrooms.

In de evenwichtssituatie kunnen de evenwichtswaterdiepte en evenwichtsverhang bepaald worden door de volgende vergelijken, uit Ribberink (2006).

$$h_e = m^n Q B^{\frac{1-n}{n}} Q_s^{-\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$i_e = \frac{Q^2}{C^2 h_e^3 B^2} \quad (6)$$

In de hoofdgeul kunnen nu drie secties worden onderscheiden: benedenstrooms van de nevengeul, ter plaatse van de nevengeul, en bovenstrooms van de nevengeul. Voor elk van de secties is hieronder verklaart wat het verschil is tussen de situatie zonder nevengeul, en de evenwichtssituatie met nevengeul.

Benedenstrooms van de nevengeul

In dit traject vind er geen debiet-onttrekking plaats. Het debiet voor de situatie met en zonder nevengeul is gelijk. De evenwichtswaterdiepte en -verhang veranderen dus niet. In dit traject zal dus geen verandering optreden.

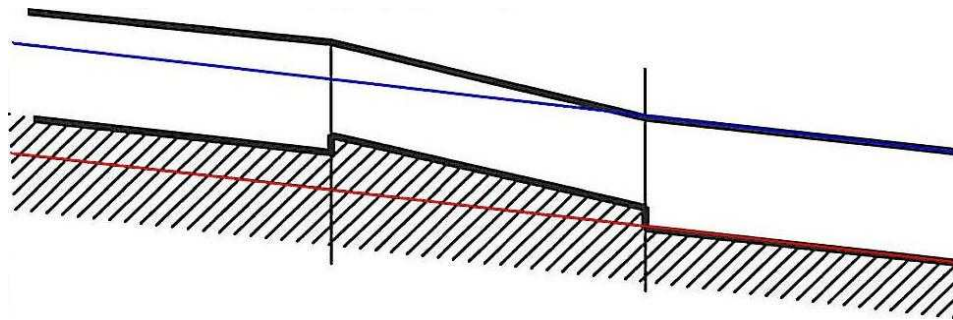
Ter plaatse van de nevengeul

In dit traject vindt de debiet-onttrekking plaats. De uiteindelijke evenwichtswaterdiepte is lineair gerelateerd aan het debiet ($h_e \sim Q$), zie Vergelijking (5). Dat betekent dat 3% debiet-onttrekking ook zal leiden tot 3% vermindering van de evenwichtswaterdiepte. Merk op dat hierbij ervan wordt uitgegaan dat het sedimenttransport door de hoofdgeul gelijk blijft, wat in 2D niet het geval is. Kijkend naar het evenwichtsverhang, dan verminderd dus zowel het debiet als de evenwichtswaterdiepte in Vergelijking (6). Het debiet vermindert quadratisch, en de evenwichtswaterdiepte tot de derde macht. Dat betekent dat onder de streep de afname groter is, wat leidt tot een verhoging van het evenwichtsverhang. Dit geldt voor iedere debiet-onttrekking. Door de verhoging van het verhang, zal de waterstand in dit gedeelte toenemen.

Bovenstrooms van de nevengeul

Evenals in de sectie benedenstrooms van de nevengeul vindt bovenstrooms van de nevengeul geen debiet-onttrekking plaats. In dit gedeelte verandert de evenwichtswaterdiepte en -verhang daarom niet. Toch treedt hier wel waterstandsverhoging op. Dit komt omdat ter plaatse van de nevengeul de waterstand is toegenomen (door de toename in verhang). Dit werkt bovenstrooms door.

Visueel is dit weergegeven in Afbeelding 46.



Afbeelding 46: Evenwichtssituatie in de hoofdgeul na aanleg van een nevengeul (ter plaatse van de middensectie), naar Ribberink (2006). In rood de initiële bodemligging en in blauw de initiële waterstand voor aanleg van de nevengeul.

Hierin is goed te zien dat de toename van het verhang in het middensectie van de hoofdgeul leidt tot waterstandsverhoging bovenstrooms. Omdat debiet-onttrekking altijd zal leiden tot toename in het verhang, zal debiet-onttrekking dus ook altijd leiden tot waterstandsverhoging bovenstrooms. In het geval van een meestromende nevengeul, betekent dit dat in de evenwichtssituatie altijd waterstandsverhoging bovenstrooms kan worden verwacht.