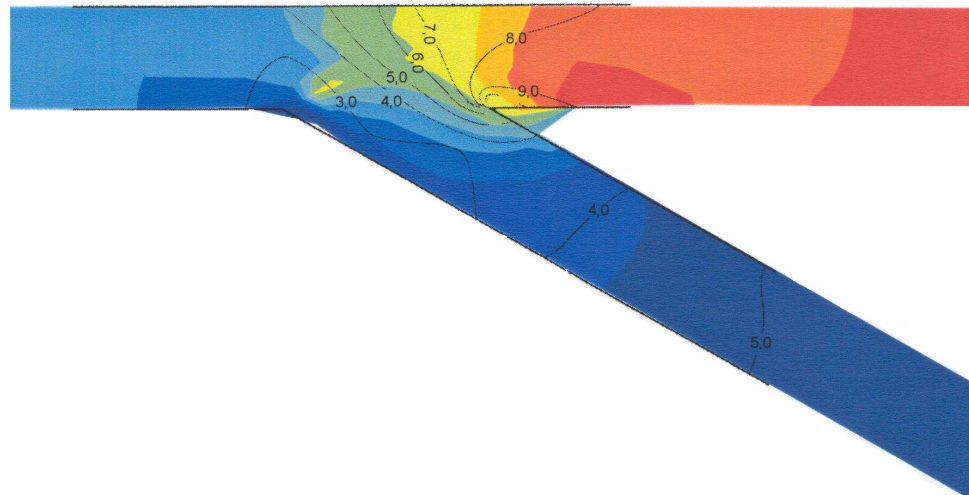
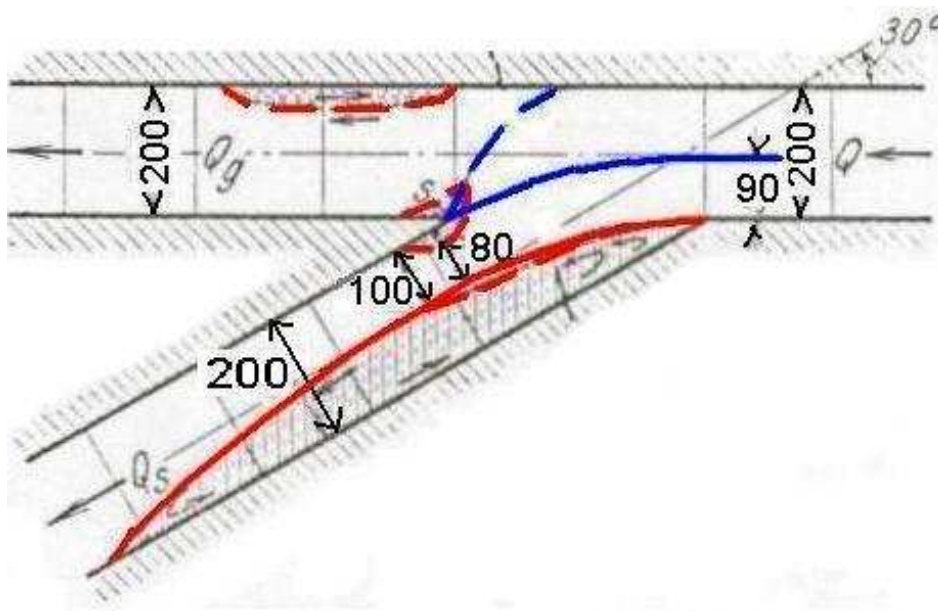


SEDIMENTVERDELING BIJ RIVIERSPLITSINGEN

Ontwerp van een splitsingspuntrelatie



Aftsudeeronderzoek: eindrapport

A.F.M. de Heer
16 juni 2003

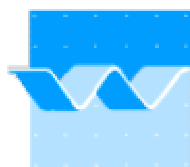
INFORMATIE AFSTUDEERONDERZOEK

- Titel:** Sedimentverdeling bij riviersplitsingen, ontwerp van een splitsingspuntrelatie.
- In opdracht van:** Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) te Arnhem
- Student:** A.F.M. de Heer C9315373
arjandeheer@hotmail.com
- Opleidingsinstituut:** Universiteit: Technische Universiteit Delft
Faculteit: Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie: Waterbouwkunde en Geotechniek
Vakgroep: Rivierwaterbouwkunde
- Afstudeercommissie:** Prof.dr.ir. H.J. de Vriend *hoogleraar TU Delft, sectie Rivierwaterbouwkunde*
Dr.ir. E. Mosselman *begeleider TU Delft, sectie Rivierwaterbouwkunde / WL|Delft Hydraulics*
Dr.ir. J. Sieben *begeleider RIZA*
Dr.ir. A. van Mazijk *gecommitteerde TU Delft, sectie Hydrologie*
- Probleemstelling:** Het ontbreken van kennis over de kwantitatieve relatie tussen geometrische en fysische grootheden voor de sedimentverdeling bij splitsingspunten in rivieren. Er is daarom geen algemeen toepasbare splitsingspuntrelatie voor de sedimentverdeling bij riviersplitsingen beschikbaar.
- Doelstelling:** Het afleiden uit 2-D riviermorfologie van een algemeen toepasbare 1-D splitsingspuntrelatie voor de verdeling van sediment over de riviertakken bij een riviersplitsing.
De relatie kan gebruikt worden voor:
 - krijgen van fysisch inzicht (verband tussen geometrische en fysische grootheden);
 - het doen van kwantitatieve voorspellingen (ontwerpgereedschap);
 - rapid assessment (ontwerpgereedschap).
De splitsingspuntrelatie is gevalideerd met bestaande waarnemingen Door vergelijking van de water- en sedimentbeweging volgens de literatuur en volgens *Delft3D* is bepaald of *Delft3D* geschikt is om de situatie bij een splitsingspunt na te bootsen.
- Periode:** 01-10-'02 t/m 31-01-'03: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) te Arnhem.
01-02-'03 t/m 16-06-'03: WL|Delft Hydraulics te Delft.
Totaal: 35 weken

Werkdocumentnummer RIZA: 2003.102X
Projectnummer WL|Delft Hydraulics: Q3336

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



wl | delft hydraulics



VOORWOORD

Dit rapport is de eindrapportage van mijn afstudeeronderzoek, getiteld "Sedimentverdeling bij riviersplitsingen". Het afstudeeronderzoek vormt het laatste onderdeel van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Tijdens mijn afstudeeronderzoek heb ik een splitsingspuntrelatie voor de sedimentverdeling bij riviersplitsingen afgeleid. Het afstudeeronderzoek is opgedeeld in twee delen. De theorievorming is uitgevoerd bij het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) in Arnhem, de adviesdienst van Rijkswaterstaat. In deze periode ben ik voornamelijk begeleid door dhr. Sieben van het RIZA. Ik herinner me een inspirerende en plezierige tijd. De validatie van de afgeleide relatie vond plaats bij WL|Delft Hydraulics, zodat dagelijkse begeleiding door dhr. Mosselman vanuit de TU Delft mogelijk werd. Ook hier ben ik enorm gestimuleerd door geïnteresseerde collega's.

Verder wil ik de volgende mensen bedanken: de overige leden van mijn afstudeercommissie, prof. De Vriend (TU Delft) en dhr. Van Mazijk (TU Delft), en mijn collega's uit Arnhem en Delft. Hierbij wil ik met name dhr. Baur, dhr. Jagers en dhr. Sloff noemen.

Arjan de Heer

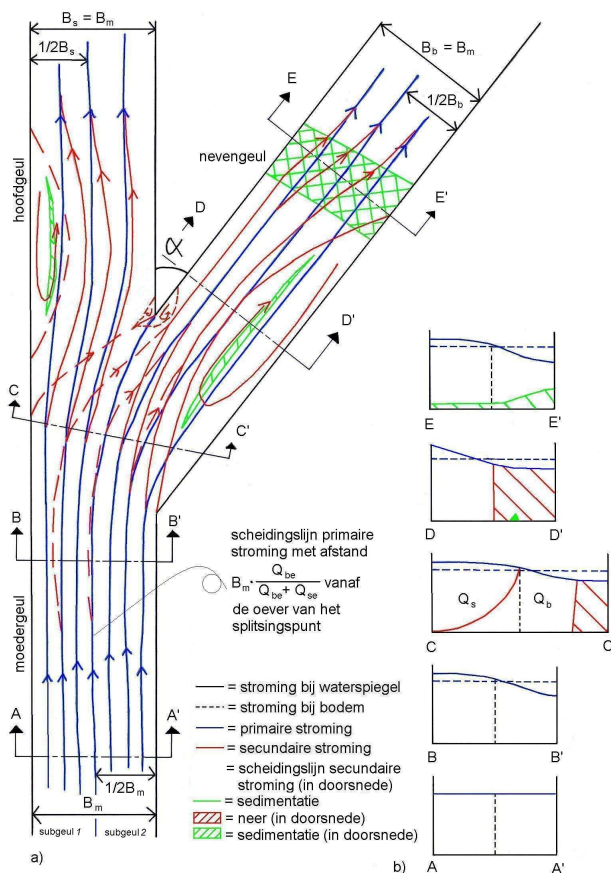
Delft, 16 juni 2003

SAMENVATTING

Zowel op kleine schaal als op grote schaal komen er in rivieren splitsingspunten voor. Bij een splitsingspunt op grote schaal splitst een rivier zich in twee of meer geulen die dezelfde orde van grootte hebben wat betreft debiet en geometrie. In de Nederlandse Rijntakken is dit bijvoorbeeld de IJsselkop bij Westervoort. Deze splitsingspunten zijn altijd actueel geweest, omdat een goede bevaarbaarheid van de geulen benedenstrooms van het splitsingspunt afhankelijk is van een goede water- en sedimentbeweging op de splitsing.

Een splitsingspunt op kleine schaal is de afsplitsing van een nevengeul van de hoofdgeul. Specifieke kenmerken van de nevengeul zijn dat het debiet in en de geometrie van de nevengeul een orde van grootte kleiner zijn dan voor de hoofdgeul en dat de nevengeul na enige afstand weer samenvloeit met de hoofdgeul. De splitsingspunten op kleine schaal staan sinds een jaar of tien in de belangstelling. De Nederlandse overheid wil de Nederlandse Rijntakken opnieuw inrichten, zodat ze een meer natuurlijk uiterlijk krijgen. Tegelijkertijd kunnen knelpunten worden weggenomen.

Voor de bepaling van het effect van de herinrichting van de Nederlandse Rijntakken is er kennis nodig over de morfologische effecten hiervan. Kwalitatieve kennis over het gedrag van de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt is al aanwezig. Splitsingspuntrelaties die de sedimentverdeling kwantitatief beschrijven zijn er wel, maar deze zijn slecht onderbouwd onnauwkeurig. Hierdoor is het gedrag van het morfologische systeem gevoelig. Het doel van dit afstudeeronderzoek is daarom het afleiden uit 2-D riviermorfologie van een algemeen toepasbare 1-D splitsingspuntrelatie. Deze kan worden gebruikt voor het krijgen van fysisch inzicht en het doen van kwantitatieve voorspellingen. Daarnaast is bekeken of het numerieke modelleringsprogramma *Delft3D* geschikt is om de sedimentbeweging bij een splitsingspunt na te bootsen.



Figuur S.1: Stroombeeld in een rechte geul met afsplitsende geul met dezelfde breedte.

Voor de theorievorming is uitgegaan van literatuur van Bulle [1926] en Riad [1961]. De 2-D riviermorfologie is gebaseerd op een model van Struiksma (Struiksma *et al.* [1985], Struiksma & Crosato [1989]). Uit analyse van het stroombeeld bij een splitsingspunt aan de hand van Bulle [1926] en Riad [1961] bleek dat de waterbeweging bij een splitsingspunt kan worden gescheiden in een globale en lokale waterbeweging. De sedimentbeweging volgt de waterbeweging, zodat men uit een goede beschrijving van de waterbeweging de sedimentbeweging kan afleiden, zie Fig. S.1.

De globale waterbeweging beschrijft de debietsverdeling over de hoofd- en nevengeul aan de hand van de evenwichtsdebieten van de hoofd- en nevengeul en is gelijk aan de primaire stroming. De primaire stroming wordt gedefinieerd als de 3-D stroming met dezelfde dieptegemiddelde snelheidsvectoren als de werkelijke stroming, maar waarvan de horizontale stroomsnelheden overal volgens gelijkvormige profielen met uniforme stroming over de diepte zijn verdeeld. Aan de hand van het stroombeeld

bovenstrooms van het splitsingspunt kan de stroming worden verdeeld in een stroombaan naar de hoofdgeul en een stroombaan naar de nevengeul. Het sediment dat wordt getransporteerd in de stroombaan naar de nevengeul, is het gevolg van de primaire stroming naar de nevengeul. De grootte van dit transport blijkt afhankelijk te zijn van de afstand vanaf het begin van een verstoring, bijvoorbeeld een bocht, in de moedergeul tot het splitsingspunt. De globale waterbeweging is beschreven met het twee-geulenmodel van Struiksma (Struiksma [1983], De Vriend *et al.* [2001]), een vereenvoudiging van eerder genoemd model.

Het splitsingspunt verstoort de globale waterbeweging. De lokale waterbeweging is de afwijking van de werkelijke waterbeweging ten opzichte van de globale waterbeweging. Door de afbuiging van een deel van het debiet naar de nevengeul, treedt er een spiraalstroming op. Samen met de dwarshelling leidt deze ertoe dat sediment uit de stroombaan naar de hoofdgeul naar de nevengeul wordt getransporteerd. Dit transport is afhankelijk van:

1. het sedimenttransport per eenheid van breedte in de primaire stroombaan naar de hoofdgeul;
2. de verstoringlengte van de waterbeweging in bovenstroomse richting door het splitsingspunt;
3. de richting van het sedimenttransport ter plaatse van het splitsingspunt. Deze is afhankelijk van de kromming van de waterbeweging en de dwarshelling van de bodem;
4. de afmetingen van de neer. Bij de bovenstroomse oever van de nevengeul ontstaat er een neer ten gevolge van de traagheid van de stroming. De afmetingen van de neer zijn een maat voor de niet gegenereerde impuls om debiet naar de nevengeul af te buigen, of de invloed van de scheefheid van de debietverdeling. De grootte van de neer is afhankelijk van het debiet in de moedergeul en de hoek van afsplitsing;
5. de sedimentverdeling over de diepte. In dit afstudeeronderzoek is alleen bodemtransport beschouwd. In dat geval is de sedimentverdeling over de diepte niet van belang.

De invloed van al deze elementen is langs theoretische weg bepaald, behalve voor de invloed van de afmetingen van de neer. Voor de bepaling van de invloed van de debietverdeling waren er genoeg waarnemingen beschikbaar, voor de bepaling van de invloed van de hoek van afsplitsing was dit niet het geval. Een correctiefactor voor de invloed van de hoek van afsplitsing is dus niet bepaald.

De uiteindelijke vorm van de splitsingspuntrelatie kan worden beschreven met Vergelijking (S.1). Deze vergelijking beschrijft het sedimenttransport in de stroombanen naar de hoofd- en nevengeul plus het sedimenttransport naar of uit die stroombanen ten gevolge van de lokale waterbeweging. De correctiefactor c geeft de invloed weer van de niet gegenereerde impuls om debiet af te buigen naar de nevengeul.

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{S_{sp} - S_{bs} + S_{ss}}{S_{bp} + S_{bs} - S_{ss}} \cdot c \quad (\text{S.1})$$

Hierin is:	S_s	sedimenttransport naar de hoofdgeul	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	S_b	sedimenttransport naar de nevengeul	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	S_{sp}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de globale waterbeweging	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	S_{bs}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	S_{ss}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van lokale waterbeweging	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	S_{bp}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de globale waterbeweging	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	c	coëfficiënt die een maat is voor de niet gegenereerde hoeveelheid impuls om debiet af te buigen naar de nevengeul	$[-]$

Uitschrijven van Vergelijking (S.1) geeft Vergelijking (S.2):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)} \cdot e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}} \quad (S.2)$$

Hierin is:	S	sedimenttransport	[m ³ /s]
	s	eigenschap van de hoofdgeul (straight channel)	
	b	eigenschap van de nevengeul (branched channel)	
	Q	debiet	[m ³ /s]
	e	evenwichtswaarde behorende bij geometrie geul	
	B	breedte geul	[m]
	1	eigenschap van subgeul 1	
	2	eigenschap van subgeul 2	
	γ	hoek tussen de waterbeweging en de sedimentbeweging ten gevolge van kromming van de waterbeweging en dwarshelling van de bodem	[°/rad]
	L _s	verstoring lengte waterbeweging in bovenstroomse richting ten gevolge van het splitsingspunt	[m]
	e	calibratiefactor voor de coëfficiënt c die de invloed van de niet gegenereerde impuls weergeeft	[-]
	f	calibratiefactor die de invloed van de debietverdeling in de macht van de coëfficiënt c weergeeft	[-]

Met behulp van de bestaande waarnemingen is Vergelijking (S.2) gevalideerd. Hierin zijn twee situaties te onderscheiden:

- Rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$; $f = 1$;
- Rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$ en

$$- \frac{B_b}{B_s} = 0,67; f = 1;$$

$$- \frac{B_b}{B_s} = 0,25; f = 2.$$

Om de exacte waarden van e en f en de invloed van $\frac{B_b}{B_s}$ te bepalen, is extra onderzoek nodig.

Belangrijke aantekening bij deze conclusie is dat de coëfficiënt c in de vorm $c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{Q_s}{Q_b}}$ slechts

toepasbaar is voor $\frac{Q_s}{Q_b} \in [0;4]$. Voor grotere waarden van de debietverdeling, moet c worden aangepast.

Een aantal van de experimenten van Roosjen (Roosjen & Zwanenburg [1995]) zijn uitgevoerd met grotere waarden voor de debietverdeling. Naar aanleiding van hun resultaten kan de schatting worden gegeven dat voor $\frac{Q_s}{Q_b} \in [4;10]$ geldt dat $f = 2$. Dit is een belangrijk punt, omdat de in dit afstudeeronderzoek

afgeleide splitsingspuntrelatie de sedimentverdeling bij een splitsingspunt op kleine schaal moet kunnen voorspellen (Een splitsingspunt op kleine schaal is de afsplitsing van een nevengeul van de hoofdgeul die na enige tijd weer samenvloeien. Deze nevengeul ligt in de uiterwaarden, zie § 1.1.). In zo'n geval is de

verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} \approx 20$.

Om te bepalen of er in de toekomst met numerieke modelleringssoftware extra waarnemingen kunnen worden gegenereerd, is er een vergelijking gemaakt tussen de beschrijving van de water- en de sedimentbeweging volgens Bulle en *Delft3D*. In tegenstelling tot de resultaten van Bulle, kon er alleen een gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul worden bereikt als de benedenstroomse waterstand in de nevengeul werd gemanipuleerd. Bulle en *Delft3D* zijn vergeleken voor de situaties waarin $\alpha = 30^\circ$ en $\alpha = 60^\circ$. Voor elke situatie is er voor de waterbeweging een simulatie gemaakt bij gelijke benedenstroomse waterstanden en één met gedwongen gelijke debietverdeling. Beide simulaties bleken goed overeen te komen met de resultaten van Bulle, zodat bij de simulatie van de sedimentbeweging alleen een simulatie is gedaan met gelijke benedenstroomse waterstanden. Ook de sedimentbeweging volgens *Delft3D* kwam goed overeen met de resultaten van Bulle.

Als laatste is een vergelijking gemaakt van de bestaande splitsingspuntrelaties met de relatie die in dit rapport is afgeleid. Hiervoor zijn de splitsingspuntrelaties genomen die als keuzemogelijkheden aanwezig zijn in het 1-D morfologische model *SOBEK*. Uit bestudering van deze relaties bleek dat deze voornamelijk de sedimentbeweging volgens de primaire waterbeweging beschrijven. Het optreden van spiraalstroming wordt onderkend en wordt gecorrigeerd met bepaalde factoren. De waarde van deze factoren is niet goed te doorgronden.

INHOUDSOPGAVE

INFORMATIE AFSTUDEERONDERZOEK.....	3
voorwoord	5
samenvatting.....	7
inhoudsopgave.....	Error! Bookmark not defined.
lijst van symbolen.....	Error! Bookmark not defined.
lijst van figuren	17
lijst van tabellen	21
1. inleiding.....	23
1.1. Splitsingspunten in rivieren	23
1.2. Probleembeschrijving.....	24
1.3. Probleem- en doelstelling.....	25
1.4. Opzet afstudeeronderzoek.....	25
1.5. Aannamen en definities.....	26
1.6. Lezershandleiding	26
2. Literatuurstudie	29
2.1. Eigenschappen van sedimenttransport	29
2.2. Bulle.....	31
2.2.1. Waterbeweging volgens Bulle	32
2.2.2. Sedimentbeweging volgens Bulle.....	33
2.2.3. Overzicht experimenten Bulle.....	34
2.3. Riad	34
2.3.1. Water- en sedimentbeweging volgens Riad.....	34
2.3.2. Overzicht experimenten Riad	40
2.4. Habermaas	41
2.5. Kwalitatieve beschrijving water- en sedimentbeweging aan de hand van Bulle en Riad	42
2.5.1. Globale waterbeweging	42
2.5.2. Lokale waterbeweging	42
2.5.3. Gekromde moedergeul	49
2.5.4. Tijdseffect.....	50
2.6. Kwantitatieve relaties in de literatuur	51
2.7. Conclusies literatuurstudie	53
3. formulering concept-splitsingspuntrelatie.....	55
3.1. Globale water- en sedimentbeweging	55
3.1.1. Globale waterbeweging	55
3.1.2. Globale sedimentbeweging	55
3.1.3. Oplossing globale water- en sedimentbeweging.....	57
3.2. Sedimenttransport ten gevolge van globale en lokale waterbeweging	60
3.2.1. Schematisatie sedimenttransport naar hoofdgeul en nevengeul	60
3.2.2. Globale waterbeweging	61
3.2.3. Lokale waterbeweging	63
3.3. Concept-splitsingspuntrelatie.....	68
4. Analyse waarnemingen	71
4.1. Inventarisatie en classificatie waarnemingen	71
4.1.1. Laboratoriumexperimenten.....	71
4.1.2. Schaalmodellen	76
4.2. Conclusies analyse waarnemingen	79
5. Validatie splitsingspuntrelatie	81
5.1. Vergelijking berekeningen met waarnemingen.....	81
5.1.1. Rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul	82
5.1.2. Rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul	85
5.2. Conclusies vergelijking experiment met concept-splitsingspuntrelatie	87
6. Kwalitatieve vergelijking Bulle en <i>Delft3D</i>	89

6.1.	Vergelijking waterbeweging	89
6.1.1.	$\alpha = 30^\circ$	89
6.1.2.	$\alpha = 60^\circ$	94
6.2.	Vergelijking sedimentbeweging	99
6.2.1.	$\alpha = 30^\circ$	99
6.2.2.	$\alpha = 60^\circ$	102
6.3.	Conclusies vergelijking Bulle en Delft3D	104
7.	discussie	105
7.1.	Splitsingspuntrelaties	105
7.2.	Delft3D.....	107
8.	conclusies	109
8.1.	Conclusies uit theorievorming.....	109
8.2.	Conclusies uit validatie.....	111
8.3.	Conclusies uit kwalitatieve vergelijking Bulle en Delft3D.....	112
9.	Aanbevelingen.....	113
BRONNEN		115
Literatuur		115
Websites.....		116
A.	EXPERIMENTEN HABERMAAS	117
B.	Afleiding globale water- en sedimentbeweging	123
B.1.	Waterbeweging	125
B.2.	Sedimentbeweging.....	126
B.2.1.	Sedimentbalans	126
B.2.2.	Transportmodel.....	127
B.3.	Totale oplossing	130
B.4.	Bepaling breedte stroombanen.....	132
B.5.	Samenvatting	133
B.5.1.	Nauwkeurige oplossing.....	133
B.5.2.	Eenvoudige oplossing.....	134
C.	Afleiding lokale sedimentbeweging	135
C.1.	Verstoringslengte sedimentbeweging.....	136
C.2.	Richting sedimenttransport	137
C.3.	Afmetingen naar	140
C.4.	Sedimentverdeling over de diepte	140
C.5.	Sedimenttransport per eenheid van breedte	141
C.6.	Totale oplossing uit theorie	141
C.7.	Vereenvoudiging totale oplossing.....	142
D.	numerieke gegevens validatie.....	145
D.1.	Riad	145
D.2.	Bulle.....	145
D.3.	Roosjen	148
E.	Waarnemingen uit literatuur	149
E.1.	Laboratoriumexperimenten	149
E.1.1.	Bulle [1926]	149
E.1.2.	Riad [1961].....	150
E.1.3.	Habermaas [1935]	E.151
E.1.4.	Shafai-Bagestan [1999]	152
E.1.5.	Den Dekker & Voorthuizen[1994] en Roosjen & Zwanenburg [1995].....	153
E.2.	Schaalmodellen.....	154
E.2.1.	Pannerdensche Kop (Van der Zwaard [1981]).....	154
E.2.2.	IJsselkop (De Vries & Van de Werf [1969])	154
F.	uitklapvel plattegrond van en stroombeeld bij een splitsingspunt	155

LIJST VAN SYMBOLEN

subscripts

<i>symb.</i>	<i>omschrijving</i>	<i>waarde</i>	<i>eenh.</i>	<i>vgl.</i>
<i>b</i>	eigenschap nevengeul (branched channel)	-	-	Fig. 2.4
<i>ce</i>	evenwichtswaarde	-	-	3.14
<i>e</i>	evenwichtswaarde behorende bij geometrie geul	-	-	2.5
<i>i</i>	nummer van de geul	-	-	7.4
<i>j</i>	nummer van de geul	-	-	7.4
<i>m</i>	eigenschap moedergeul (mother channel)	-	-	Fig. 2.4
<i>s</i>	eigenschap hoofdgeul (straight channel)	-	-	Fig. 2.4
<i>t</i>	index die het totale volume aangeeft dat het splitsingspunt betreft	-	-	7.4
<i>tr</i>	eigenschap in transversale of dwarsrichting	-	-	2.7
<i>x</i>	eigenschap van een parameter in x-richting, dit is de langsrichting	-	-	3.4
<i>y</i>	eigenschap van een parameter in x-richting, dit is de dwarsrichting	-	-	3.4
<i>0</i>	beginwaarde parameter	-	-	2.6
<i>1</i>	eigenschap van Subgeul 1	-	-	Fig. 3.5
<i>2</i>	eigenschap van Subgeul 2	-	-	Fig. 3.5

Romeinse letters

<i>symb.</i>	<i>omschrijving</i>	<i>waarde</i>	<i>eenh.</i>	<i>vgl.</i>
<i>a</i>	hoogte boven bodem van de scheidingslijn tussen suspensietransport en bodemtransport	-	m	2.7
<i>a</i>	calibratiefactor voor de verstoringlengte	5	-	3.36
<i>A</i>	oppervlakte stroomvoerende dwarsprofiel	-	m ²	Tabel 2.1
<i>A</i>	coëfficiënt voor de richting van de snelheid bij de bodem bij een logaritmisch snelheidsprofiel	-	-	3.9
<i>b</i>	calibratiefactor voor de coëfficiënt voor de richting van de snelheid bij de bodem bij een logaritmisch snelheidsprofiel	2,75	-	3.38
<i>B</i>	breedte dwarsprofiel	-	m	Fig. 2.4
<i>B_b</i>	effectieve toegangsbreedte nevengeul	-	m	Fig. 2.4
<i>c</i>	sedimentconcentratie	-	m ³ /m ³	2.7
<i>c</i>	coëfficiënt die een maat is voor de niet gegeneerde hoeveelheid impuls om debiet af te buigen naar de nevengeul	-	-	3.52
<i>c_s</i>	concentratie sediment in suspensie	-	m ³ /m ³	3.41
<i>C</i>	ruwheidscoëfficiënt van Chézy, alluviale ruwheid	-	m ^{1/2} /s	Tabel 2.1
<i>d</i>	calibratiefactor voor de invloed van het sedimenttransport per eenheid van breedte	0,9	-	3.45
<i>D</i>	korreldiameter sediment	-	mm	Tabel 2.5
<i>D₅₀</i>	mediane korreldiameter	-	mm	3.8
<i>e</i>	calibratiefactor voor coëfficiënt <i>c</i> die de invloed van de niet gegeneerde impuls weergeeft	-	-	Tabel 5.1
<i>E</i>	calibratiecoëfficiënt voor de invloed van de dwarshelling	≈ 1	-	3.10
<i>f</i>	calibratiefactor voor de invloed van de scheefheid van de debietverdeling op de sedimentverdeling	-	-	Tabel 5.1
<i>f(θ)</i>	weegfunctie die de invloed van de bodemhellingen bepaalt	-	-	3.10
<i>Fr</i>	getal van Froude	-	-	blz. 2.17
<i>F_{mv}</i>	middelpuntvliedende kracht	-	N	2.2
<i>F_p</i>	drukkraft	-	N	blz. 2.7
<i>g</i>	versnelling van de zwaartekracht	9,81	m/s ²	2.4

h	waterdiepte	-	m	Tabel 2.1
h	piëzometrisch niveau, statische hoogte	-	m	2.4
\bar{h}	gemiddelde waterdiepte in de <i>gehele</i> geul	-	m	3.24
\hat{h}	amplitude waterdiepte	-	m	2.6
H	energiehoogte	-	m	2.4
\hat{H}	amplitude waterdiepte	-	m	3.15
i_b	verhang bodem	-	m/m	Fig. 2.4
IP	interactieparameter	-	-	3.13
k	ruwheid rivierbed volgens Nikuradse	-	m	Tabel 2.1
L	afstand vanaf het begin van een verstoring in de moedergeul	-	m	3.18
L_D	dempingslengte verstoring	-	m	3.14
L_P	golflengte verstoring	-	m	3.14
L_s	verstoringlengte waterbeweging in bovenstroomse richting ten gevolge van het splitsingspunt	-	m	Fig. 3.6
m	massa	-	kg	2.2
m	coëfficiënt voor het sedimenttransport	-	m^{2-n}/s^{1-n}	3.8
m	vorm van de stationaire bodemgolf in dwarsrichting	1	-	3.12
m	calibratiefactor voor de invloed van de verhouding van de breedtes op de sedimentverdeling	-	-	7.6
n	macht van de snelheid in de sedimenttransportformule	5	-	3.8
n	totaal aantal geulen waarin de rivier zich splitst	-	-	7.4
O	natte omtrek stroomvoerende dwarsprofiel	-	m	Tabel 2.1
p	druk	-	Pa	2.4
\bar{p}	impulsdichtheid	-	Ns	2.3
q	debiet per eenheid van breedte	-	m^2/s	B.2
Q	debiet	-	m^3/s	Fig. 2.4
R	straal bochtromming	-	m	2.2
Re	getal van Reynolds	-	-	Tabel 4.1
R_h	hydraulische straal	-	m	Tabel 2.1
$R.$	effectieve kromtestraal stroomlijn, straal van de kromming van de as van de geul	-	m	3.9
s	sedimenttransport per eenheid van breedte	-	m^2/s	Fig. 2.4
s_{bs}	sedimenttransport per eenheid van lengte ten gevolge van de lokale waterbeweging	-	m^2/s	Fig. 3.6
\bar{s}	resultante sedimenttransport per eenheid van breedte	-	m^2/s	Fig. B.2
S	sedimenttransport	-	m^3/s	Fig. 2.4
S_b	sedimenttransport naar de nevengeul	-	m^3/s	3.17
S_{bp}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de globale waterbeweging	-	m^3/s	3.17
S_{bs}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging	-	m^3/s	3.17
S_s	sedimenttransport naar de hoofdgeul	-	m^3/s	3.16
S_{sp}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de globale waterbeweging	-	m^3/s	3.16
S_{ss}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de lokale waterbeweging	-	m^3/s	3.16
t	tijd	-	s	Tabel 2.2
u	snelheid in x-richting, dit is de langsrichting	-	m/s	3.1
u'	afwijking van u van de gemiddelde waarde \bar{u}	-	m/s	C.6
u_*	schuifspanningssnelheid	-	m/s	2.1
\bar{u}	gemiddelde snelheid in de <i>gehele</i> geul	-	m/s	3.19
U	verschil in snelheid tussen Subgeul 1 en Subgeul 2	-	m/s	3.19
\hat{U}	amplitude snelheid in x-richting	-	m/s	3.14
v	snelheid in y-richting, dit is de dwarsrichting	-	m/s	2.7

w_s	valsnelheid sediment	-	m/s	2.1
x	afstand in langsrichting	-	m	3.1
x_h	faseverschuiving sedimentbeweging	-	m	3.15
x_p	afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van de globale verstoring	-	m	Fig. 3.5
x_s	afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van de lokale verstoring	-	m	Fig. 3.6
x_u	faseverschuiving waterbeweging	-	m	3.14
y	afstand in dwarsrichting	-	m	2.6
z	afstand in verticale richting	-	m	2.7
z_b	hoogte ten opzichte van referentiehoogte, plaatshoogte	-	m	2.4

Griekse letters

<i>symb.</i>	<i>omschrijving</i>	<i>waarde</i>	<i>eenh.</i>	<i>vgl.</i>
α	hoek van afsplitsing	-	$^{\circ}/\text{rad}$	Fig. 2.4
α_s	calibratiefactor voor de invloed van de debietverdeling op de sedimentverdeling	-	-	7.5
β_s	calibratiefactor voor de sedimentverdeling	-	-	7.5
β_x	correctiecoëfficiënt voor helling in langsrichting	-	-	B.18
β_y	correctiecoëfficiënt voor helling in dwarsrichting	-	-	B.19
δ	hoek bodemschuifspanning met waterbeweging	-	$^{\circ}/\text{rad}$	3.9
Δ	relatieve dichtheid sediment onder water	-	-	Tabel 2.5
ε	calibratiecoëfficiënt voor de intensiteit van de spiraalstroming	1	-	3.9
ε_p	poriëngehalte	-	-	3.4
γ	hoek sedimentbeweging met waterbeweging	-	$^{\circ}/\text{rad}$	3.10
γ	vermenigvuldigingsfactor van de sedimenttransportformule volgens SOBEK-handleiding	-	-	7.6
γ_b	hoek sedimentbeweging met waterbeweging door kromming nevengeul	-	$^{\circ}/\text{rad}$	3.42
γ_s	hoek sedimentbeweging met waterbeweging door kromming hoofdgeul	-	$^{\circ}/\text{rad}$	3.48
φ	hoek tussen richting resultante bodemschuifspanning en bodemschuifspanning in x-richting	-	$^{\circ}/\text{rad}$	Fig. B.2
κ	Von Karman constante	$\approx 0,4$	-	3.9
λ_R	relaxatielengte rotatievrije stroming	-	m	C.8
λ_s	relaxatielengte sedimentbeweging	-	m	3.12
λ_s^*	relaxatielengte sedimentbeweging in twee-geulen-model	-	m	3.22
λ_w	relaxatielengte waterbeweging	-	m	3.11
ν	kinematische viscositeit water	-	m^2/s	3.5
ξ	correctiefactor voor de invloed van de lokale waterbeweging op het sedimenttransport naar de nevengeul	-	-	3.53
θ	Shieldsparameter	-	-	3.10
θ	verhouding tussen breedte Subgeul 1 en breedte moedergeul	-	-	3.19
ρ_s	dichtheid sediment	2.650	kg/m^3	Tabel 2.5
ρ_w	dichtheid water	1.000	kg/m^3	2.4
σ	correctiefactor voor de invloed van de lokale waterbeweging op het sedimenttransport naar de hoofdgeul	-	-	3.53
T_b	bodemschuifspanning	-	N/m^2	3.5
ζ	hoogte waterspiegel ten opzichte van referentieniveau	-	m	Fig. 3.5

LIJST VAN FIGUREN

figuur titel

- 1.1 Splitsingspunten op grote en kleine schaal.
- 1.2 Impressie van het huidige en het toekomstige uiterlijk van de rivier.
- 1.3 Schets uitgangssituatie stabiliteitsanalyse.
- 1.4 Plattegrond geulensysteem met splitsingspunt.

- 2.1 Krachten op korrels bij de bodem.
- 2.2 Classificatie sedimenttransport.
- 2.3 Concentratieverdeling sediment over de diepte.
- 2.4 Plattegrond proefopstelling Bulle en naamgeving bij een splitsingspunt.
- 2.5 Stroombeeld voor $\alpha = 30^\circ$ en $Q_m = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 2.6 Bodemvormen aan het eind van de proeven met een looptijd van 45 en 75 min.
- 2.7 Circulatiestroming ten gevolge van verdeling van F_{mv} en F_p over de diepte.
- 2.8 Stromingsrichting bij bodem en waterspiegel ten gevolge van kromming van de geul
- 2.9 Verduidelijking stroombeeld bij bodem en waterspiegel.
- 2.10 Definitieschets wet van Bernouilli.
- 2.11 Verloop statische hoogte bij experimenten van Riad.
- 2.12 Twee voorbeelden van proefopstellingen bij de experimenten van Habermaas.
- 2.13 Stroombeeld in een rechte geul met afsplitsende geul met dezelfde breedte.
- 2.14 Verval in dwarsrichting bij verschillende afbuigingshoeken α (30° , 60° en 90°).
- 2.15 Toename verval in dwarsrichting en afname afmetingen van de neer in de nevengeul bij gelijkblijvende debietverdeling en halvering van de breedte van de nevengeul.
- 2.16 Debiet- en sedimentverdeling bij $Q_m = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 2.17 Zeefkrommen van het sediment in de moeder-, hoofd- en nevengeul.
- 2.18 Schets vorm dwarsdoorsnede bij rechte en gekromde geul.
- 2.19 Verloop van het opgevangen sediment in de tijd.
- 2.20 Overzichtstekening splitsingspunt met scheidingsmuur.
- 2.21 Definitieschets suspensietransport.
- 2.22 Transversaal snelheidsprofiel.

- 3.1 Definitie assenstelsel voor dieptegemiddelde stroming.
- 3.2 Verloop aanpassing bodemligging aan opgelegde kromming.
- 3.3 Verband interactieparameter IP en stabiliteit bodemligging.
- 3.4 Verloop aanpassing water- en sedimentbeweging aan verstoring als $IP < 1$.
- 3.5 Definitie twee-geulenmodel met de karakteristieke parameters per geul.
- 3.6 Sediment uit Subgeul 1 dat naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd onder invloed van de lokale waterbeweging.
- 3.7 Karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de globale waterbeweging.
- 3.8 Concentratieverdeling sediment over de diepte.

- 4.1 Plattegrond proefopstelling Shafai-Bagestan.
- 4.2 Plattegrond proefopstelling BUET.
- 4.3 Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ in laboratoriumexperimenten.
- 4.4 Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ voor bepaalde waarden van de hoek van afsplitsing α in laboratoriumexperimenten met een rechte moeder- en hoofdgeul.

- 4.5 Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ voor bepaalde waarden van de hoek van afsplitsing α in laboratoriumexperimenten met een gekromde moedergeul of een gekromde hoofdgeul.
- 4.6 Hoek van afsplitsing α tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$.
- 4.7 Plattegrond Pannerdensch Kop.
- 4.8 Plattegrond IJsselkop.
- 4.9 Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ in schaalmodellen.
- 5.1 Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Riad.
- 5.2 Vergelijkingen waarnemingen en berekeningen $Ri1$ en $Ri2$ wat betreft sedimentverdeling voor Riad.
- 5.3 Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ri2$ en $Ri3$ wat betreft debiet- en sedimentverdeling voor Riad.
- 5.4 Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Roosjen.
- 5.5 Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ro1$ en $Ro2$ voor Roosjen.
- 6.1 Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.2 Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.3 Waterniveau volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.4 Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.5 Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.6 Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.7 Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.8 Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.9 Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.10 Waterniveau volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.11 Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.
- 6.12 Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.13 Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.14 Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.15 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.
- 6.16 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.
- 6.17 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.
- 6.18 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.

- 6.19 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.
- 6.20 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.
- 6.21 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.
- 6.22 Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.
- 8.1 Naamgeving bij een splitsingspunt.
- 8.2 Sedimentverdeling volgens globale en lokale waterbeweging.
- A.1 Proefopstellingen experimenten Habermaas.
- A.2 Invloed lokale kromming.
- A.3 Invloed globale kromming en afstand vanaf einde globale kromming.
- A.4 Invloed lokale kromming en afstand vanaf einde globale kromming.
- A.5 Invloed grootte globale kromming op afsplitsing in globale kromming.
- A.6 Invloed afstand vanaf begin globale kromming.
- B.1 Definitie twee-geulenmodel met de karakteristieke parameters per geul.
- B.2 Afleiding dwarstransport.
- C.1 Sediment uit Subgeul 1 dat naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd onder invloed van de lokale waterbeweging.
- C.2 Bepaling afstand waarover verstoring verwaarloosbaar is uitgedrukt in aantal keren λ_R .
- C.3 Schematisatie A.
- C.4 Afleiding relatie $L_s - R_s - \alpha$.
- C.5 Karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming.
- C.6 Concentratieverdeling sediment over de diepte.
- C.7 Balansgebied om $s_1(x)$ te bepalen.
- C.8 Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_n} = 0,5$.
- C.9 Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_n} = 0,75$.
- C.10 Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_n} = 1,0$.
- D.1 Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Bulle.
- D.2 Vergelijking waarnemingen en berekeningen voor Bulle.
- D.3 Vergelijking waarnemingen en berekeningen wat betreft hoek van afsplitsing en sedimentverdeling voor Bulle voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0;0,15]$.

LIJST VAN TABELLEN

tabel *titel*

- 2.1 Parameters proefopstelling Bulle.
- 2.2 Overzicht experimenten Bulle.
- 2.3 Korte beschrijving resultaten experimenten Bulle.
- 2.4 Parameters proefopstelling Riad.
- 2.5 Overzicht experimenten Riad.
- 2.6 Korte beschrijving resultaten experimenten Riad.
- 2.7 Gevolgen van de verandering van parameters voor de waterbeweging.
- 2.8 Gevolgen van de verandering van parameters voor de sedimentbeweging.

- 4.1 Gegevens laboratoriumexperimenten.
- 4.2 Gegevens schaalmodellen.

- 5.1 Invoerparameters handberekeningen Riad.
- 5.2 Invoerparameters handberekeningen Roosjen.

- 6.1 Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke benedenstroomse waterstand voor de hoofd- en nevengeul.
- 6.2 Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.3 Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke benedenstroomse waterstand voor de hoofd- en nevengeul.
- 6.4 Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.
- 6.5 Figuren die de sedimentbeweging beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$.
- 6.6 Figuren die de sedimentbeweging beschrijven voor $\alpha = 60^\circ$.

- 9.1 Doel simulaties voor kwantitatief onderzoek in *Delft3D*.

- D.1 Numerieke gegevens berekeningen Riad.
- D.2 Invoerparameters handberekeningen Bulle.
- D.3 Numerieke gegevens berekeningen Bulle.
- D.4 Numerieke gegevens berekeningen Roosjen.

- E.1 Waarnemingen door Bulle.
- E.2 Waarnemingen door Riad.
- E.3 Waarnemingen door Habermaas
- E.4 Waarnemingen door Shafai-Bagestan.
- E.5 Waarnemingen door Roosjen & Zwanenburg.
- E.6 Waarnemingen in schaalmodel Pannerdensche Kop.
- E.7 Waarnemingen in schaalmodel IJsselkop.

1. INLEIDING

1.1. *Splitsingspunten in rivieren*

Op verschillende schalen kan gekeken worden naar splitsingspunten in rivieren. Ten eerste is er de afsplitsing van een riviertak. Dit is een splitsingspunt op grote schaal. In de Nederlandse Rijntakken bevinden zich de splitsingspunten de Pannerdensch Kop, de splitsing van de Bovenrijn in de Waal en het Pannerdensch Kanaal bij Pannerden, en de IJsselkop, de afsplitsing van de IJssel van de Nederrijn bij Westervoort, zie Fig. 1.1a. Op kleine schaal is er de afsplitsing van een nevengeul van de hoofdgeul. Specifiek kenmerk van een nevengeul is dat deze zich na enige afstand weer bij de hoofdgeul voegt. In Fig. 1.1b is het nevengeulenstelsel bij Gameren weergegeven.



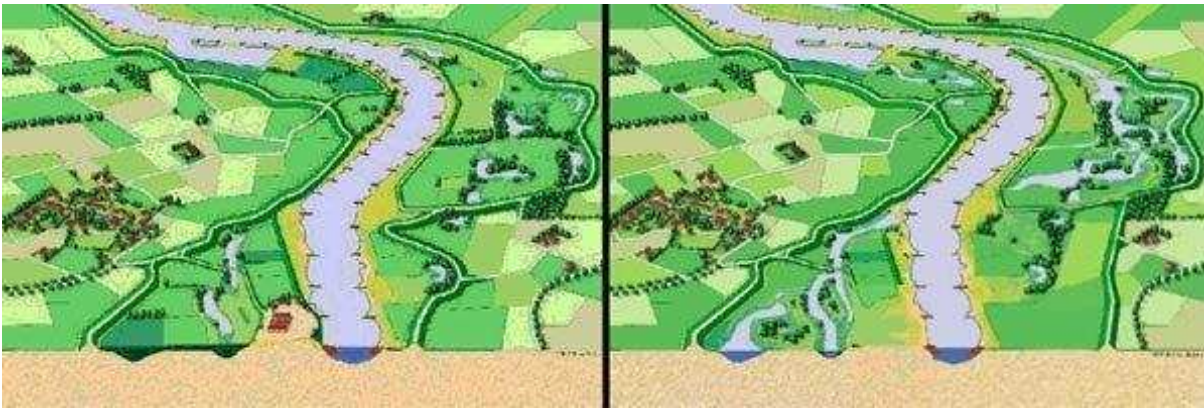
1.1a: Splitsingspunt op grote schaal: IJsselkop bij Westervoort.



1.1b: Splitsingspunt op kleine schaal: nevengeulenstelsel in de Waal bij Gameren.

Figuur 1.1: Splitsingspunten op grote en kleine schaal. De foto's zijn genomen vanaf een hoogte van 1.500 m (www.terradesk.nl).

De splitsingspunten op grote schaal zijn in Nederland altijd actueel geweest, omdat de riviertakken onderdeel uitmaken van de hoofdtransportroutes over water. Een goede water- en sedimentverdeling is daar belangrijk voor de bevaarbaarheid van de Nederlandse rivieren. De splitsingspunten op kleine schaal staan pas sinds een jaar of tien in de belangstelling, omdat men de Nederlandse Rijntakken een natuurlijker uiterlijk wil geven (Mosselman [2001], Silva *et al* [2000]). Dit wil men onder andere realiseren door in de uiterwaarden nevengeulen aan te leggen en een grotere diversiteit aan planten en dieren te laten leven in de buurt van de rivier. Tegelijkertijd moet de rivier de capaciteit behouden om bij hoogwater het aangevoerde debiet af te voeren. Bij de herinrichting van de Nederlandse Rijntakken wordt daarom geprobeerd knelpunten weg te nemen. In Fig. 1.2 zijn twee impressies weergegeven van het huidige uiterlijk van een rivier en hoe dat in de toekomst zou moeten zijn.



1.2a: Impressie huidig uiterlijk rivier.

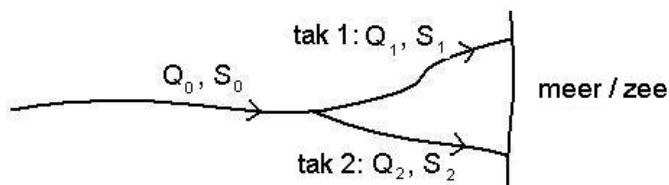
1.2b: Impressie toekomstig uiterlijk rivier.

Figuur 1.2: Impressie van het huidige en het toekomstige uiterlijk van de rivier (www.rijn-on-line.nl).

1.2. Probleembeschrijving

Voor de bepaling van het effect van de herinrichting van de Nederlandse Rijntakken is kennis nodig over de morfologische effecten hiervan. Deze effecten spelen zich op kleine schaal af ter plaatse van een nevengeul. Op grote schaal zijn er effecten op de debiet- en sedimentverdeling bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop. De bepaling van de debietverdeling is vrij goed te bepalen met behulp van het bovenstrooms aangevoerde debiet en de benedenstroomse waterstanden. Wat betreft de sedimentverdeling bestaat er momenteel vooral kwalitatieve kennis in de vorm van vuistregels.

In de jaren negentig heeft Wang voor estuaria het morfologische model *ESTMORF* ontwikkeld (Wang *et al.* [1995]). Hierbij is speciaal gekeken naar de sedimentverdeling bij splitsingspunten in estuaria, omdat er ter plaatse van splitsingspunten in de geulen van een estuarium complexe situaties ontstaan. Op deze plekken is de debietverdeling afhankelijk van de geometrie van de geulen en de 3-D structuur van de stroming ter plaatse van het splitsingspunt. Tijdens de ontwikkeling van *ESTMORF* is een stabiliteitsanalyse gedaan voor het sedimentgedrag bij splitsingspunten. Resultaat was een vuistregel voor de stabiliteit van de geulen benedenstrooms van een splitsingspunt. De uitgangssituatie is weergegeven in Fig. 1.3.

Figuur 1.3: Schets uitgangssituatie stabiliteitsanalyse (Wang *et al.* [1995]).

De geulen worden geacht in evenwicht te zijn. Er kunnen zich drie evenwichtssituaties voordoen:

1. Beide geulen blijven open, waarbij elke tak een deel van het debiet en sediment vervoert;
2. Geul 2 wordt gesloten ($Q_2 = S_2 = h_2 = 0$) en al het debiet en sediment wordt vervoerd door geul 1;
3. Geul 1 wordt gesloten ($Q_1 = S_1 = h_1 = 0$) en al het debiet en sediment wordt vervoerd door geul 2.

Doel van de stabiliteitsanalyse was het bepalen van de invloed van de waarde van de coëfficiënt k in Vergelijking (1.1) op het systeemgedrag.

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \quad (1.1)$$

De coëfficiënt k is afhankelijk van de lokale geometrie en moet voor elke specifieke situatie apart bepaald worden. Het resultaat van de analyse was dat een kritieke waarde van k de grens vormt tussen situatie 1.

en situaties 2. en 3. Het voorkomen van situatie 2 of 3 hangt af van de verhoudingen $\frac{Q_1}{Q_2}$ en $\frac{B_1}{B_2}$. Door vereenvoudiging van de geometrie van de riviertakken is slechts een overgangsgebied tussen een stabiel en een instabiel netwerk te geven, waarvoor geldt:

- voor $k < \frac{n}{3}$: situatie 2. of 3. treedt op. De tak met de grootste initiële waterdiepte blijft open;
- voor $k > \frac{n}{3}$: situatie 1. treedt op, beide takken blijven open.

De waarde van n representeert de macht van de snelheid in de sedimenttransportformule. In dit onderzoek wordt de formule van Engelund & Hansen [1967] toegepast, zodat $n = 5$.

Naast kwalitatieve kennis over het morfologiegedrag bij een splitsingspunt, is er voor het ontwerp van een splitsingspunt echter ook kennis nodig in kwantitatieve zin (hoeveel sediment gaat er naar welke tak). Splitsingspuntrelaties beschrijven de verdeling van het sediment over de riviertakken bij een splitsingspunt. Een algemeen toepasbare knooppuntsrelatie die de kwantitatieve verdeling weergeeft is er wel, maar deze is slecht onderbouwd en onnauwkeurig. Hierdoor is het gedrag van het morfologische systeem gevoelig. Met behulp van een splitsingspuntrelatie gebaseerd op vereenvoudigde theoretische concepten en beschikbare waarnemingen zou tot een beter ontwerp gekomen kunnen worden.

1.3. Probleem- en doelstelling

Aan de hand van de probleembeschrijving in § 1.2 kunnen de probleem- en doelstelling worden geformuleerd:

Probleemstelling:

Het ontbreken van kennis over de kwantitatieve relatie tussen geometrische en fysische grootheden voor de sedimentverdeling bij splitsingspunten in rivieren. Er is daarom geen algemeen toepasbare splitsingspuntrelatie voor de sedimentverdeling bij riviersplitsingen beschikbaar.

Doelstelling:

1. *Het afleiden uit 2-D riviermorfologie van een algemeen toepasbare 1-D splitsingspuntrelatie voor de verdeling van sediment over de riviertakken bij een riviersplitsing;*
2. *De relatie kan gebruikt worden voor:*
 - a. *het krijgen van fysisch inzicht (verband tussen geometrische en fysische grootheden);*
 - b. *het doen van kwantitatieve voorspellingen (ontwerpgereedschap);*
 - c. *rapid assessment (ontwerpgereedschap).**De splitsingspuntrelatie is gevalideerd met bestaande waarnemingen;*
3. *Door vergelijking van de water- en sedimentbeweging volgens de literatuur en volgens Delft3D is bepaald of Delft3D geschikt is om de situatie bij een splitsingspunt na te bootsen.*

1.4. Opzet afstudeeronderzoek

Het afstudeeronderzoek kan worden opgedeeld in vier fasen:

- Literatuurstudie;
- Opstellen concept-splitsingspuntrelatie;
- Validatie met bestaande waarnemingen;
- Kwalitatieve vergelijking stroombeeld volgens literatuur en *Delft3D*.
-

In de eerste fase is een onderzoek gedaan naar bestaande literatuur. Doel van deze fase was inzicht te krijgen in de relevante processen ter plaatse van een splitsingspunt en de riviermorfologie in het algemeen. De literatuurstudie richtte zich hoofdzakelijk op bestudering van de experimenten van Bulle

[1926] en Riad [1961] en de 2-D riviermorfologie volgens Struiksma *et al.* [1985] en Struiksma & Crosato [1989].

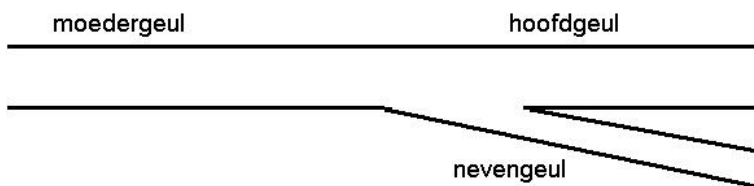
Aan de hand van de literatuurstudie is een principeschets gemaakt van de water- en sedimentbeweging ter plaatse van een splitsingspunt. Deze heeft geleid tot de formulering van een concept-splitsingspuntrelatie. Deze twee fasen zijn uitgevoerd bij het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) in Arnhem.

De derde fase omvatte het analyseren van bestaande waarnemingen. Met behulp van de waarnemingen werd de concept-relatie gevalideerd. Vast stond dat reeds bestaande waarnemingen niet voldoende informatie bevatten om de splitsingspuntrelatie te kunnen valideren. Daarom is in de laatste fase nagegaan of *Delft3D* geschikt is om aanvullende waarnemingen te genereren door middel van simulaties. Het gebruik van een numeriek model kan bovendien beter inzicht geven in de relevante processen, zoals gesignaleerd tijdens de literatuurstudie. De laatste twee fasen zijn uitgevoerd bij WL|Delft Hydraulics in Delft.

1.5. Aannamen en definities

De volgende aannamen en definities worden gedaan in dit onderzoek:

- de stroming is stationair;
- de stroming is uniform boven- en benedenstrooms van het splitsingspunt;
- alleen bodemtransport wordt beschouwd;
- alleen de splitsing van een rivier in twee geulen wordt onderzocht;
- de hoofdgeul is de geul waar het grootste deel van het debiet naar toe stroomt en is als het ware het verlengde van de moedergeul. De nevengeul is de geul waar het kleinste deel van het debiet uit de moedergeul naar toe stroomt. In het geval van gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul is de nevengeul de geul die de grootste hoek van afsplitsing maakt ten opzichte van de moedergeul, zie Fig. 1.4;



Figuur 1.4: Plattegrond geulensysteem met splitsingspunt.

- op het splitsingspunt liggen de bodem van de moeder-, hoofd- en nevengeul op dezelfde hoogte. Dit betekent dat er in lengterichting gezien geen drempel ligt aan het begin van de hoofd- en nevengeul. Het gevolg hiervan is dat het stroombeeld niet wordt beïnvloed door discontinuïteiten.

1.6. Lezershandleiding

De opbouw van het rapport volgt in grote lijnen de volgorde waarin de werkzaamheden voor dit onderzoek zijn uitgevoerd.

In dit hoofdstuk is reeds het probleem beschreven en zijn de probleem- en doelstelling geformuleerd. Om inzicht te krijgen in de processen die zich afspelen ter plaatse van een splitsingspunt, wordt in Hoofdstuk 2 een samenvatting gegeven van de literatuurstudie. Dit hoofdstuk bevat ook een kwalitatieve beschrijving van de water- en sedimentbeweging ter plaatse van een splitsingspunt. Hoofdstuk 3 haalt eerst theorie aan over verstoringen in rivieren en de morfologische reactie daarop. Deze wordt toegepast op de formulering van een concept-splitsingspuntrelatie. Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 de waarnemingen geanalyseerd. De waarnemingen zijn gebruikt om de concept-splitsingspuntrelatie uit Hoofdstuk 3 te valideren, zie Hoofdstuk 5.

De waarnemingen die bekend zijn uit de literatuur zijn niet voldoende om de splitsingspuntrelatie te kunnen valideren. In Hoofdstuk 6 wordt een kwalitatieve vergelijking gemaakt tussen het stroombeeld bij een splitsingspunt volgens de literatuur, de eigen interpretatie en *Delft3D*. Aan de hand van deze vergelijking is bepaald of *Delft3D* geschikt is om extra waarnemingen te genereren. Hoofdstuk 7 bevat een vergelijking met de bestaande splitsingspuntrelaties en een discussie over het gebruik van *Delft3D*.

voor het genereren van extra waarnemingen. De Hoofdstukken 8 en 9 bevatten de conclusies en aanbevelingen.

De naamgeving van en de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt zijn vrij moeilijk te beschrijven. Daarom bevat Bijlage *F* een uitklapvel met een plattegrond en de naamgeving bij een splitsingspunt en de eigen interpretatie van de water- en sedimentbeweging.

2. LITERATUURSTUDIE

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de bestudeerde literatuur. Daarvoor worden in § 2.1 eerst de eigenschappen van sedimenttransport beschreven. De belangrijkste literatuur voor dit onderzoek, een rapport van Bulle [1926] en de dissertatie van Riad [1961], worden in § 2.2 en § 2.3 samengevat. Daarnaast heeft Habermaas [1935] uitgebreid onderzoek gedaan naar de sedimentverdeling bij verschillende proefopstellingen. De resultaten hiervan worden kort beschreven in § 2.4. Andere literatuur neemt de kwalitatieve beschrijvingen van Bulle en Riad over en richt zich op het formuleren van een knooppuntsrelatie voor de sedimentverdeling. Daarom wordt in § 2.5 eerst een kwalitatieve beschrijving gegeven van de water- en sedimentbeweging en de bijbehorende processen ter plaatse van een splitsingspunt aan de hand van Bulle en Riad. In § 2.6 wordt een samenvatting gegeven van de literatuur die kwantitatieve relaties beschrijft. De laatste paragraaf bevat conclusies over welke processen relevant zijn voor de formulering van een splitsingspuntrelatie.

Bij de dieptegemiddelde beschrijving van driedimensionale stromingen kan men een primaire en een secundaire stroming onderscheiden.

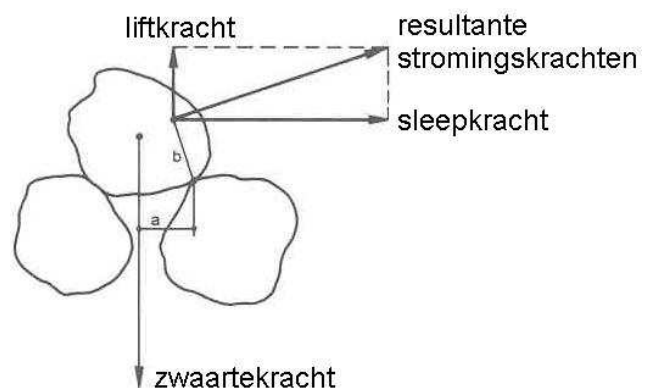
De primaire stroming wordt gedefinieerd als de 3-D stroming die dezelfde dieptegemiddelde stroomsnelheidsvectoren heeft als de echte stroming, maar waarvan de horizontale stroomsnelheden overal volgens gelijkvormige (bijvoorbeeld logaritmische) profielen met uniforme stroomrichting over de diepte verdeeld zijn.

Secundaire stroming is de afwijking van de feitelijke stroming van deze primaire stroming. Deze laat zich in twee delen onderscheiden. Afwijkingen van de vorm van het verticale stroomsnelheidsprofiel vormen de secundaire stroming in langsrichting. Deze ontstaat als de stroming versnelt of vertraagt. Afwijkingen van de stroomrichting over de verticaal vormen de secundaire stroming in dwarsrichting. Deze vormt een spiraalstroming.

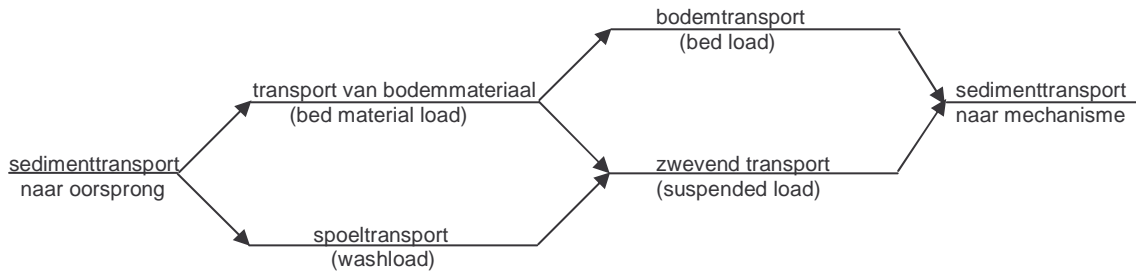
2.1. Eigenschappen van sedimenttransport

Het sediment van een rivierbed gaat bewegen onder invloed van verschillende krachten. Deze krachten kunnen globaal worden verdeeld in de zwaartekracht, stromingskrachten en reactiekrachten van omliggende korrels. De zwaartekracht op een korrel is afhankelijk van het gewicht van de korrel en de helling van de bodem, de stromingskrachten zijn afhankelijk van de stroming en de reactiekrachten van de omliggende korrels zijn afhankelijk van de vorm van het rivierbed, bijvoorbeeld inklemming tussen andere korrels, zie Fig. 2.1:

De stromingskrachten slepen het sediment mee, de reactiekrachten van de omliggende korrels werken dit tegen. De zwaartekracht kan afhankelijk van de bodemhelling mee- of tegenwerken aan beweging van het sediment. Als de stromingskrachten de zwaartekracht en de reactiekrachten overtreffen, komt de korrel in beweging en wordt deze stroomafwaarts vervoerd. Bij een voldoende grootte van de watersnelheid zijn er veel korrels in beweging en kan er worden gesproken van sedimenttransport. Het verschil tussen de stromingskrachten enerzijds en de zwaartekracht en de reactiekrachten van de omliggende korrels anderzijds bepaalt de vorm van het transport. Sedimenttransport kan worden verdeeld in twee groepen: transport van bodemmateriaal en transport van sediment dat geen deel uitmaakt van de bodem, het zogenaamde spoeltransport, zie Fig. 2.2:



Figuur 2.1: Krachten op korrels bij de bodem (Jansen *et al.* [1979]).



Figuur 2.2: Classificatie sedimenttransport (Jansen *et al.* [1979]).

Transport van bodemmateriaal kan worden opgesplitst in bodemtransport en zwevend transport. Bij bodemtransport worden de korrels wel verplaatst, maar ze zijn nooit lang los van de bodem: de korrels rollen over de bodem. Suspensietransport is het transport van sediment dat wordt losgetrokken van de bodem en waarbij de watersnelheid zo groot is dat het sediment voor langere tijd blijft zweven en geen contact heeft met de bodem. Het sediment dat wordt getransporteerd door middel van suspensietransport, maakt deel uit van de bodem.

Spoeltransport is het transport van sediment dat zo licht is, dat het altijd in suspensie blijft. Hierbij kunnen de korrels wel de bodem raken. Het sediment dat door middel van spoeltransport wordt getransporteerd, maakt echter geen deel uit van de bodemsamenstelling. De grootte van het spoeltransport wordt uitsluitend bepaald door het aanbod en niet door de transportcapaciteit van de stroming. Spoeltransport draagt bij aan het zwevende transport.

Logischerwijs kan hieruit worden geconcludeerd dat het sediment dat wordt getransporteerd door middel van bodemtransport de zwaardere en grotere korrels zijn en het sediment dat wordt getransporteerd door middel van spoeltransport de lichtste en kleinste korrels zijn. Het sediment dat wordt getransporteerd door middel van suspensietransport ligt hier qua gewicht en grootte tussenin. De grens tussen bodem- en suspensietransport is niet scherp en kan worden benaderd met Vergelijking (2.1):

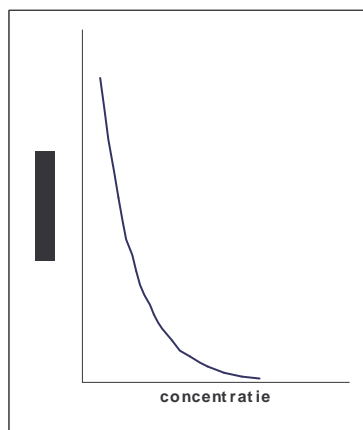
$$\frac{u_*}{w_s} \approx 1 \quad (2.1)$$

Hierin is: u_* schuifspanningssnelheid [m/s]
 w_s valsnelheid sediment [m/s]

$\frac{u_*}{w_s} < 1$ (of $w_s > u_*$): er vindt voornamelijk bodemtransport plaats

$\frac{u_*}{w_s} > 1$: er vindt zowel bodem- als zwevend transport plaats.

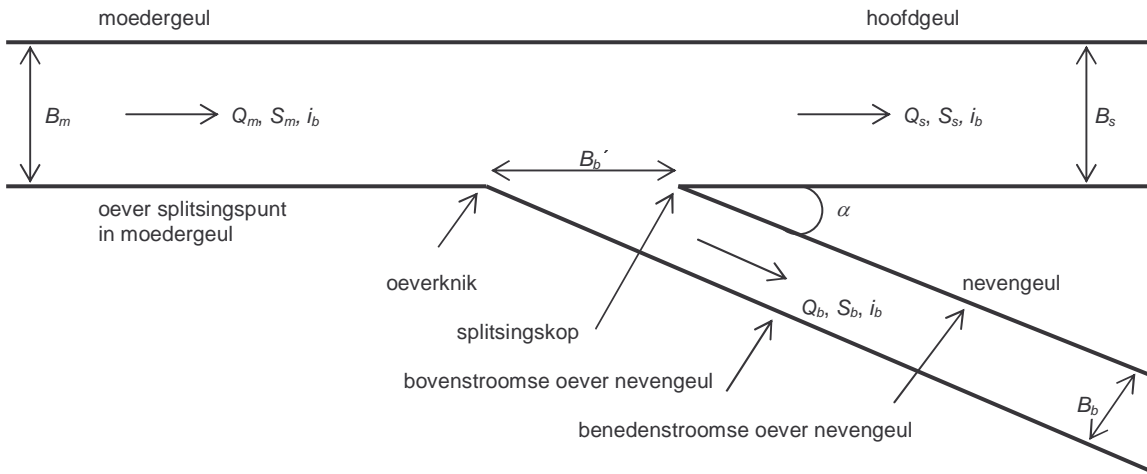
In Fig. 2.3 is een karakteristiek profiel weergegeven van de verdeling van de sedimentconcentratie over de diepte.



Figuur 2.3: Concentratieverdeling sediment over de diepte.

2.2. Bulle

Bulle [1926] was één van de eersten die de water- en sedimentbeweging bij riviersplitsingen, vooral kwalitatief, heeft beschreven. Zijn onderzoek werd uitgevoerd in een proefopstelling met een vaste bodem. Een vaste bodem kan kwantitatief gezien tot verkeerde resultaten leiden, omdat een vaste bodem niet kan eroderen en dus de sedimentbeweging niet goed nabootst. Kwalitatief gezien geven deze experimenten wél een goed beeld van de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt. Een schets van de proefopstelling met een definitie van de gebruikte parameters is te zien in Fig. 2.4.



Figuur 2.4: Plattegrond proefopstelling Bulle en naamgeving bij een splitsingspunt.

Hierin is:	<i>m</i>	eigenschap moedergeul	(mother channel)	
	<i>s</i>	eigenschap hoofdgeul	(straight channel)	
	<i>b</i>	eigenschap nevengeul	(branched channel)	
	<i>B</i>	breedte dwarsprofiel		[m]
	<i>Q</i>	debiet		[m ³ /s]
	<i>S</i>	sedimenttransport		[m ³ /s]
		= $s \cdot B$		
	<i>s</i>	sedimenttransport per eenheid van breedte		[m ² /s]
	<i>i_b</i>	verhang bodem		[m/m]
	<i>B_b'</i>	effectieve toegansbreedte nevengeul		[m]
		= $\frac{B_b}{\sin \alpha}$		
	α	hoek van afsplitsing		[° of rad]

Voor waarden van de parameters, zie Tabel 2.1:

Tabel 2.1: Parameters proefopstelling Bulle.

<i>B_m</i>	<i>B_s</i>	<i>B_b</i>	α	<i>Q</i>	<i>i_b</i>	<i>C</i>
0,20 m	0,20 m	0,20 m	30° – 150°	0,002 – 0,008 m ³ /s	0,003	onbekend

Hierin is:	<i>C</i>	ruwheidscoëfficiënt van Chézy, alluviale ruwheid		[m ^{1/2} /s]
		= $18 \cdot \log \frac{12 \cdot R_h}{k}$		
	<i>R_h</i>	hydraulische straal		[m]
		= $\frac{A}{O}$		
		= <i>h</i> als $B \gg h$		
	<i>A</i>	oppervlakte stroomvoerende dwarsprofiel		[m ²]
		= $B \cdot h$		
	<i>h</i>	waterdiepte		[m]
	<i>O</i>	natte omtrek stroomvoerende dwarsprofiel		[m]

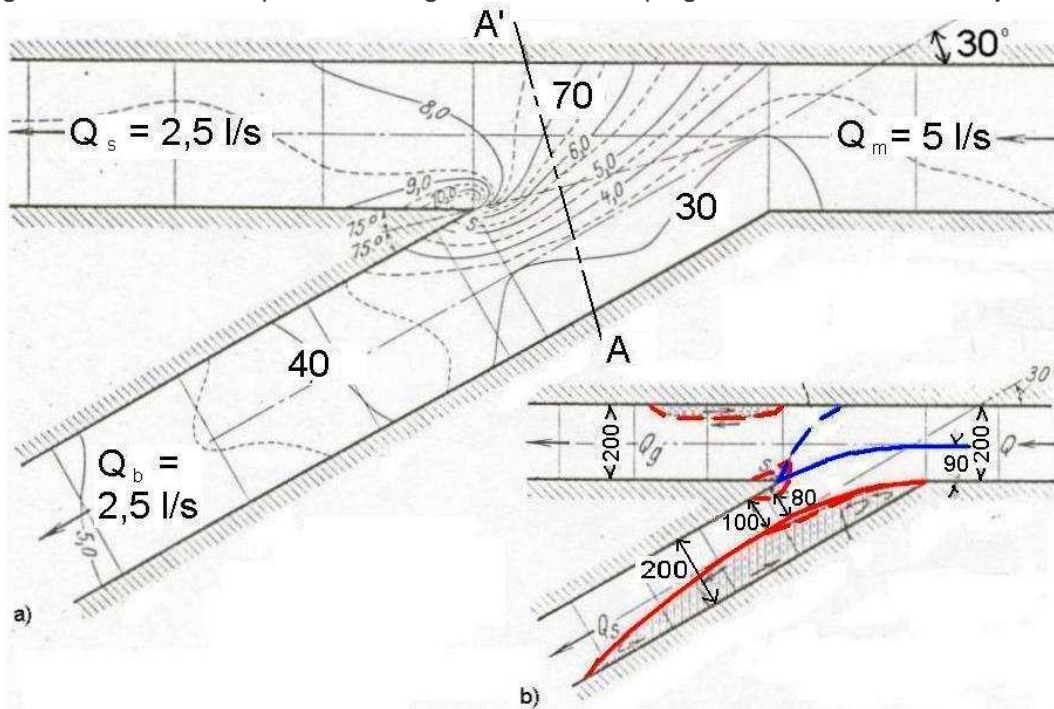
k ruwheid rivierbed volgens Nikuradse

[m]

In deze paragraaf worden eerst de water- en de sedimentbeweging beschreven aan de hand van een standaardopstelling: $\alpha = 30^\circ$, een onafgeronde oeverknik en $Q_m = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$. Vervolgens worden in §2.2.3 de resultaten beschreven van bijvoorbeeld verandering van de hoek van afsplitsing α of afronding van de oeverknik.

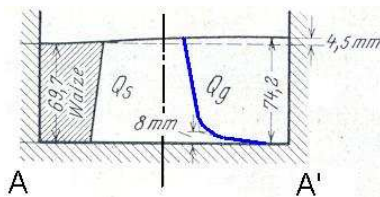
2.2.1. Waterbeweging volgens Bulle

In zijn onderzoek heeft Bulle zich eerst gericht op de bepaling van het stroombeeld. Bij deze proeven bevond zich géén sediment in het water en op de bodem (vaste-bodem-effect). In Fig. 2.5 is een tekening weergegeven van het verloop van de hoogte van de waterspiegel en het stroombeeld bij $\alpha = 30^\circ$.

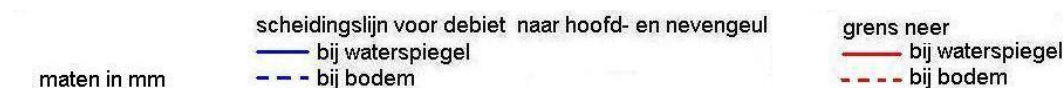


2.5a: Verloop hoogte waterspiegel.

2.5b: Stroombeeld.



2.5c: Dwarsdoorsnede A-A'.



Figuur 2.5: Stroombeeld voor $\alpha = 30^\circ$ en $Q_m = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bulle [1926]).

Uit Fig. 2.5a blijkt dat de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{2,5}{2,5} = 1$. De waterspiegel in de moeder- en nevengeul vertoont

een verval in dwarsrichting, waarbij de waterspiegel het laagst is aan de kant van de oeverknik. Aan het begin van de hoofdgeul stijgt de waterspiegel over een korte afstand sterk. In de nevengeul is er geen plotselinge stijging van de waterspiegel. Bulle merkt op dat het verhang van de waterspiegel in langsrichting kleiner is dan het verhang van de bodem i_b .

In Fig. 2.5b is te zien dat de scheidingslijn bij de waterspiegel van de stroming bestemd voor de hoofdgeul en de stroming bestemd voor de nevengeul het debiet in tweeën deelt volgens de verhouding $\frac{B_s}{B_b} = \frac{110}{90} = 1,2$. Om toch een gelijke debietverdeling te bereiken, zoals is weergegeven in Fig. 2.5a, zal er

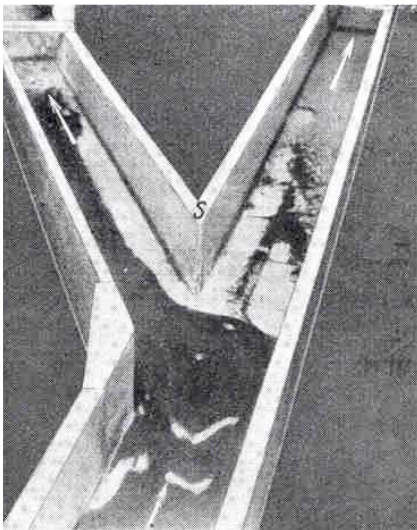
bij de bodem meer debiet naar de nevengeul dan naar de hoofdgeul moeten gaan. In werkelijkheid blijkt het gehele debiet bij de bodem naar de nevengeul te gaan, zie Fig. 2.5b en c.

Verder ontstaan er drie neren met een verticale as. De eerste bevindt zich bij de bovenstroomse oever van de nevengeul. Deze neer begint bij de oeverknik en is bij de bodem iets kleiner dan bij de waterspiegel. Bij de oever tegenover de splitsingskop ontstaat er in de hoofdgeul een neer bij de bodem. Tenslotte is er een kleine neer bij de splitsingskop, die zich afwisselend in de hoofd- en nevengeul bevindt.

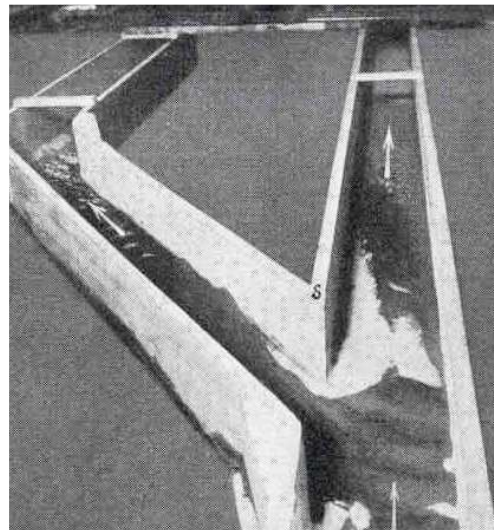
Bulle concludeert uit het ontstaan van een verval in dwarsrichting en het feit dat het gehele debiet bij de bodem de nevengeul ingaat, dat het afbuigen van een deel van het debiet naar de nevengeul een bochtstroming opwekt ter plaatse van het splitsingspunt.

2.2.2. Sedimentbeweging volgens Bulle

Bij het begin van de proeven, bevond zich in de geulen geen sediment. Het sediment dat werd toegevoegd werd gelijkmatig over de breedte van de moedergeul verdeeld en had een zodanig grote korreldiameter dat bij het ingestelde debiet er voornamelijk bodemtransport plaatsvond. Er zijn twee proeven gedaan: de eerste had een looptijd van 45 minuten, de tweede 75 minuten. Voor de bodem aan het einde van deze proeven, zie Fig. 2.6.



2.6a: Bodenvorm na een looptijd van 45 min.



2.6b: Bodenvorm na een looptijd van 75 min.

Figuur 2.6: Bodenvormen aan het eind van de proeven met een looptijd van 45 en 75 min. Op de plaatsen met de lichte kleur is de vaste bodem zichtbaar, neergeslagen sediment heeft een donkere kleur (Bulle [1926]).

Met name in Fig. 2.6a is te zien dat het sediment zeer kort voor de splitsingskop over de gehele breedte naar de nevengeul wordt afgebogen. Op de grens van de neer bezinkt het sediment. Slechts enkele procenten van het totaal toegevoegde sediment gaan naar de hoofdgeul. Uit Fig. 2.6b blijkt dat na een looptijd van 75 min. aan het begin van de nevengeul over de gehele breedte sediment is neergeslagen. Tegelijkertijd is het sedimenttransport naar de hoofdgeul bijna verdubbeld.

Bulle merkt op dat aan het begin van de proeven de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{2,5}{2,5} = 1$. Na 45 min. is deze

verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{2,75}{2,25} = 1,2$. In deze proef is de grootte van de neer in de nevengeul in de tijd gelijk. Na

75 min. is de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b}$ weer afgenomen tot 1 en is de grootte van de neer afgenomen. Bulle stelde

vervolgens de hypothese op dat er een cyclisch proces ontstaat van vorming en verwijdering van een drempel aan het begin van de nevengeul. De netto sedimentatie is hierbij nul. Dit proces wordt in § 2.5.4 gedetailleerd beschreven.

2.2.3. Overzicht experimenten Bulle

In Tabel 2.2 staat een overzicht van de experimenten die Bulle heeft uitgevoerd. De resultaten van de experimenten zijn kort beschreven in Tabel 2.3:

Tabel 2.2: Overzicht experimenten Bulle.

onderzoeksdoel	vorm bodem	vorm oeverknik	vaste parameter	variërende parameter	bereik variërende parameter	nr.	
stroombeeld	vaste bodem	onafgerond	Q = 0,005	α	30° - 150°	B1	
				Q	0,002 – 0,008 m ³ /s	B2	
		afgerond	Q = 0,005	α	30° - 90°	B3	
sedimentverdeling	vaste bodem	onafgerond	Q = 0,005	α	30° - 150°	B4	
				t	45 en 75 min.	B5	
	zandbodem	onafgerond	Q = 0,005	t = 45	t	15 en 60 min.	B6
					α	30° - 150°	B7
	vaste bodem	onafgerond	Q = 0,005	t = 45	Q_s/Q_b	1 : 1; 1,63 : 1;	B8
						α	
vaste bodem	onafgerond	Q = 0,005	t = 45	Q_s/Q_b	1 : 1 en 2,23 : 1	B9	
			α				
			$B_s/B_b =$				

Tabel 2.3: Korte beschrijving resultaten experimenten Bulle.

nr.	resultaat
B1	toename α 30° → 90° en afname α 150° → 90°: relatief meer debiet naar hoofdgeul, bredere en kortere neer in nevengeul, minder debiet bij bodem naar nevengeul. toename α 30° → 150°: toename verval in dwarsrichting t.p.v. splitsingspunt.
B2	toename Q: relatief meer debiet naar hoofdgeul.
B3	algemeen: relatief meer debiet naar nevengeul, kleinere afmetingen neer, kleiner verval in dwarsrichting.
B4	toename α 30° → 120° en afname α 150° → 120°: relatief minder sediment naar nevengeul.
B5	45 min.: alleen sedimentatie t.p.v. neer in nevengeul, afmetingen neer kleiner, relatief minder debiet naar nevengeul. 75 min. sedimentatie over gehele breedte nevengeul, neer nagenoeg verdwenen, gelijke debietverdeling.
B6	langere proefduur: sedimentatie breidt zich uit van begin nevengeul naar benedenstreams, relatief minder sediment naar nevengeul, neer in hoofdgeul verdwijnt.
B7	minder sediment naar nevengeul dan bij onafgeronde oeverknik.
B8	toename Q_s/Q_b : minder sediment naar nevengeul, neer in hoofdgeul verdwijnt, neer in nevengeul wordt groter, verval in dwarsrichting t.p.v. splitsingspunt verdwijnt.
B9	toename Q_s/Q_b : sterke afname verval in dwarsrichting t.p.v. splitsingspunt, sterk toename sedimenttransport naar hoofdgeul, grotere neer in nevengeul, meer debiet bij bodem naar nevengeul.

Hierin is: t tijd

[s]

2.3. Riad

Riad [1961] voerde soortgelijke experimenten uit als Bulle. Verschillen met de proefopstelling van Bulle zijn een vaste waarde voor de hoek van afsplitsing α , namelijk 45°, afronding van de oeverknik en een zandbodem in plaats van een vaste bodem. De invloed van een vin bovenstreams van de splitsing op de waterbeweging en de daaruit volgende sedimentbeweging is ook onderzocht. Er zijn pas metingen gedaan, nadat het zandtransport in evenwicht was. Zie Tabel 2.4 voor waarden van de parameters in de proefopstelling van Riad.

Tabel 2.4: Parameters proefopstelling Riad.

B_m	B_s	B_b	α	Q	i_b	C
0,80 m	0,80 m	0,50 m	45°	0,0605 – 0,1113 m ³ /s	0,001	onbekend

2.3.1. Water- en sedimentbeweging volgens Riad

Uit proeven van Riad bleek dat het sediment in de nevengeul een grotere diameter heeft dan het sediment in de hoofdgeul. Om dit te verklaren moet de vorm van het snelheidsprofiel over de diepte en de sedimentverdeling over de diepte in beschouwing worden genomen.

Voor de beschrijving van de invloed van het snelheidsprofiel over de diepte is eerst een algemene beschrijving nodig van de waterbeweging ter plaatse van een splitsingspunt. Onder invloed van het verval wordt een deel van het debiet gedwongen de nevengeul in te gaan. Door de traagheid van het water, neigt de stroming zijn bestaande weg te vervolgen. Dit is recht door de hoofdgeul in. Het water lijkt hierdoor de bocht uit te vliegen. Deze traagheidskracht heet de middelpuntvliedende kracht F_{mv} en is als volgt gedefinieerd, zie Vergelijking (2.2):

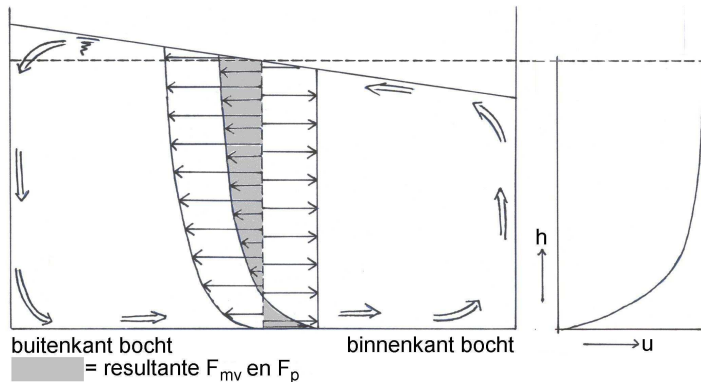
$$F_{mv} = \frac{m \cdot u^2}{R} \quad (2.2)$$

Hierin is: F_{mv} middelpuntvliedende kracht [N]
 m massa [kg]
 R straal bocht of kromming [m]

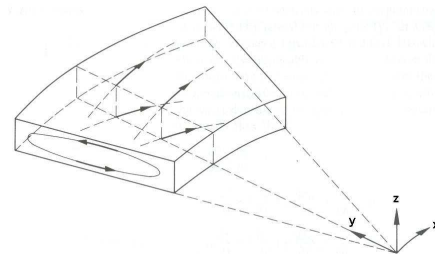
De middelpuntvliedende kracht is afhankelijk van u^2 . De snelheidsverdeling over de diepte heeft de vorm van een logaritme. Daarnaast is de straal van de kromming aan de binnenkant van de kromming kleiner dan aan de buitenkant. Dit betekent dat zowel in de diepte- als de dwarsrichting de grootte van F_{mv} varieert, met een maximum voor F_{mv} aan de buitenkant van de bocht bij de waterspiegel.

F_{mv} duwt het water naar de buitenkant van de kromming. Er ontstaat een verval in dwarsrichting (zie Fig. 2.5a en 2.5c). De zwaartekracht werkt een verschil in de waterdiepte tegen en er ontstaat een drukkracht F_p . F_p duwt de waterdeeltjes naar de binnenkant van de kromming, de plaats met de kleinste waterdiepte. In dit geval is dat de nevengeul.

De combinatie van de zwaartekracht/drukkracht F_p , die naar de binnenkant van de kromming is gericht, en de middelpuntvliedende kracht F_{mv} , die naar de buitenkant van de kromming is gericht, brengt een circulatiestroming in dwarsrichting op gang, zie Fig. 2.7. De combinatie van langsstroming, stroming van water in de lengterichting van een waterloop, en de circulatiestroming in dwarsrichting heet spiraalstroming, zie Fig. 2.8. De spiraalstroming zorgt ervoor dat het water bij de bodem vooral in de nevengeul wordt geduwd en het water bij de waterspiegel voornamelijk in de hoofdgeul terechtkomt.



Figuur 2.7: Circulatiestroming ten gevolge van verdeling van F_{mv} en F_p over de diepte.



Figuur 2.8: Stromingsrichting bij bodem en waterspiegel ten gevolge van kromming van de geul (Jansen *et al.* [1979]).

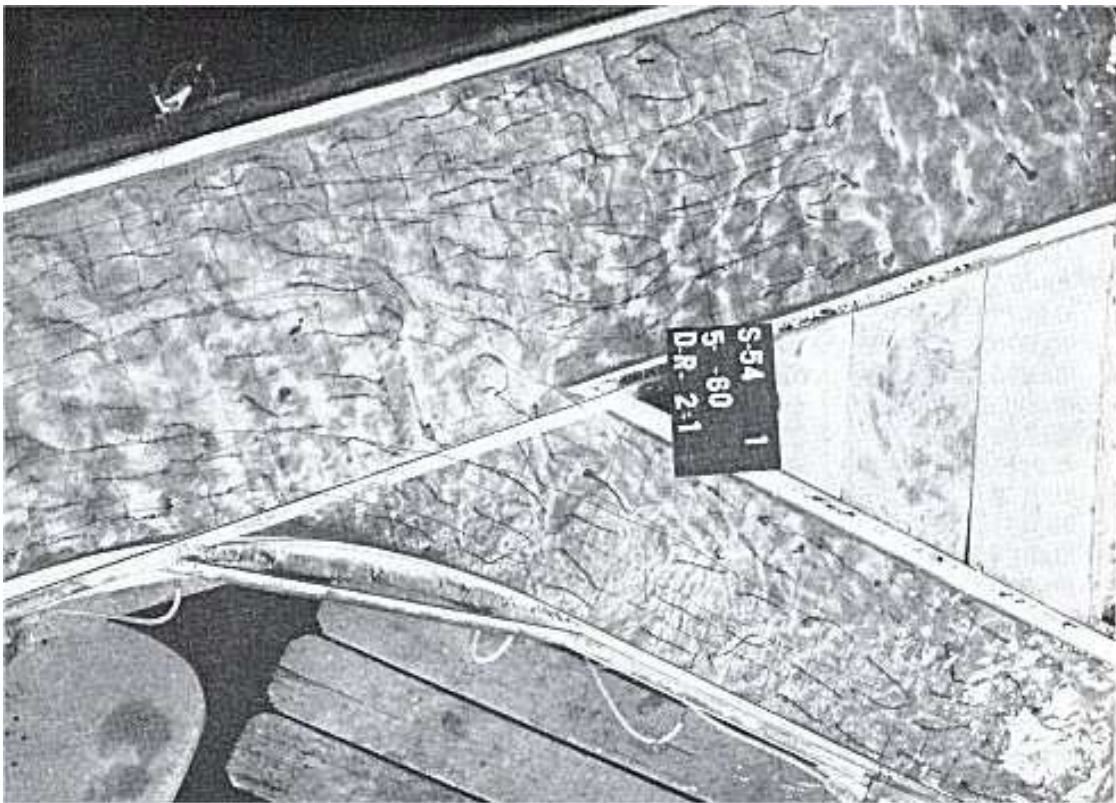
De invloed van de snelheidsverdeling over de diepte kan nu als volgt worden verklaard: door wrijving met de bodem is de watersnelheid bij de bodem kleiner dan bij de waterspiegel en heeft het snelheidsprofiel over de diepte een logaritmische vorm. Ter plaatse van het splitsingspunt moet een deel van het debiet worden afgebogen naar de nevengeul. Om een waterdeeltje af te kunnen buigen, moet de impulsrichting worden veranderd. De impulsdichtheid is gedefinieerd in Vergelijking (2.3):

$$\bar{p} = m \cdot \bar{u} \quad (2.3)$$

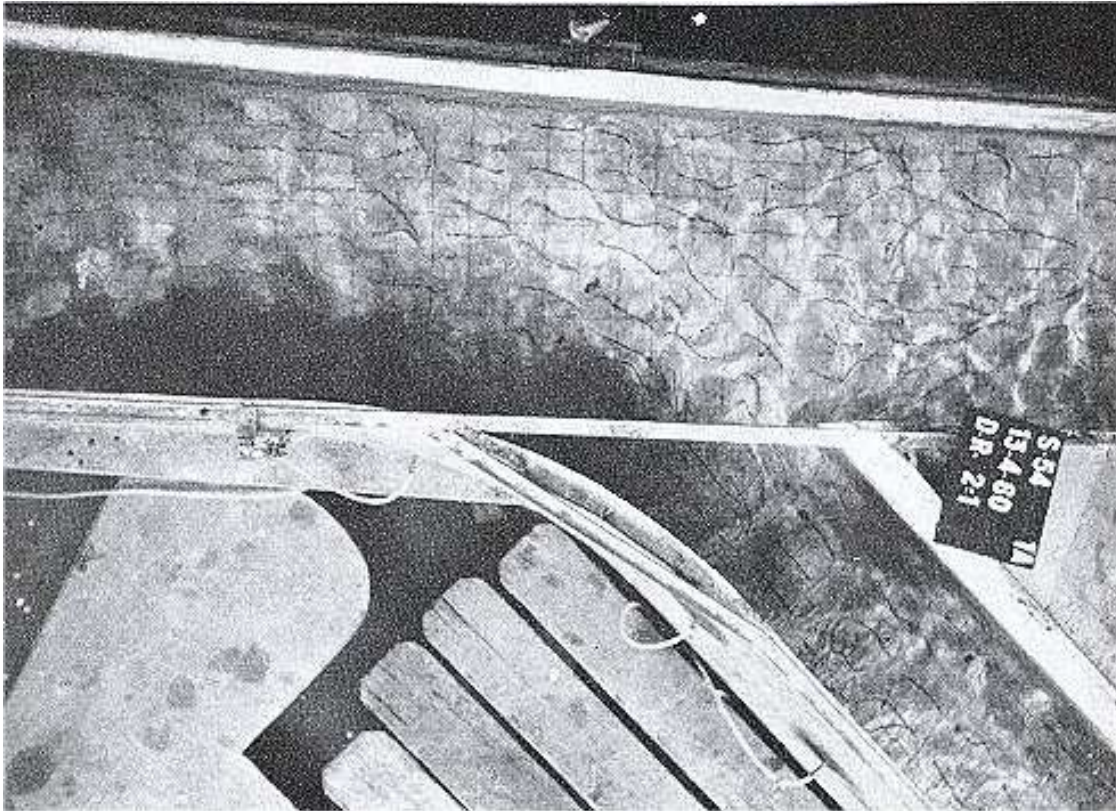
Hierin is: \bar{p} impulsdichtheid [Ns]
 \bar{u} snelheid [m/s]

Het water dat uit de moedergeul komt, heeft een impulsrichting in de langsrichting van de moedergeul. Dit is ook de langsrichting van de hoofdgeul. Voor afbuiging van waterdeeltjes naar de nevengeul, moet er dus een impuls in dwarsrichting worden uitgeoefend op de stroming. Dit houdt in dat om waterdeeltjes met een grotere snelheid af te buigen naar de nevengeul, de impuls in dwarsrichting groter moet zijn dan bij een lagere stroomsnelheid. Het water bij de bodem zal dus eerder worden afgebogen dan het water bij de waterspiegel. Aangezien de sedimentbeweging de waterbeweging volgt, zal het sediment bij de bodem worden afgebogen naar de nevengeul en het sediment hoger in de waterkolom naar de hoofdgeul gaan. Het sediment bij de bodem heeft een grotere korreldiameter (zie § 2.1), zodat het sediment dat naar de nevengeul gaat verhoudingsgewijs grover is dan het sediment dat naar de hoofdgeul gaat.

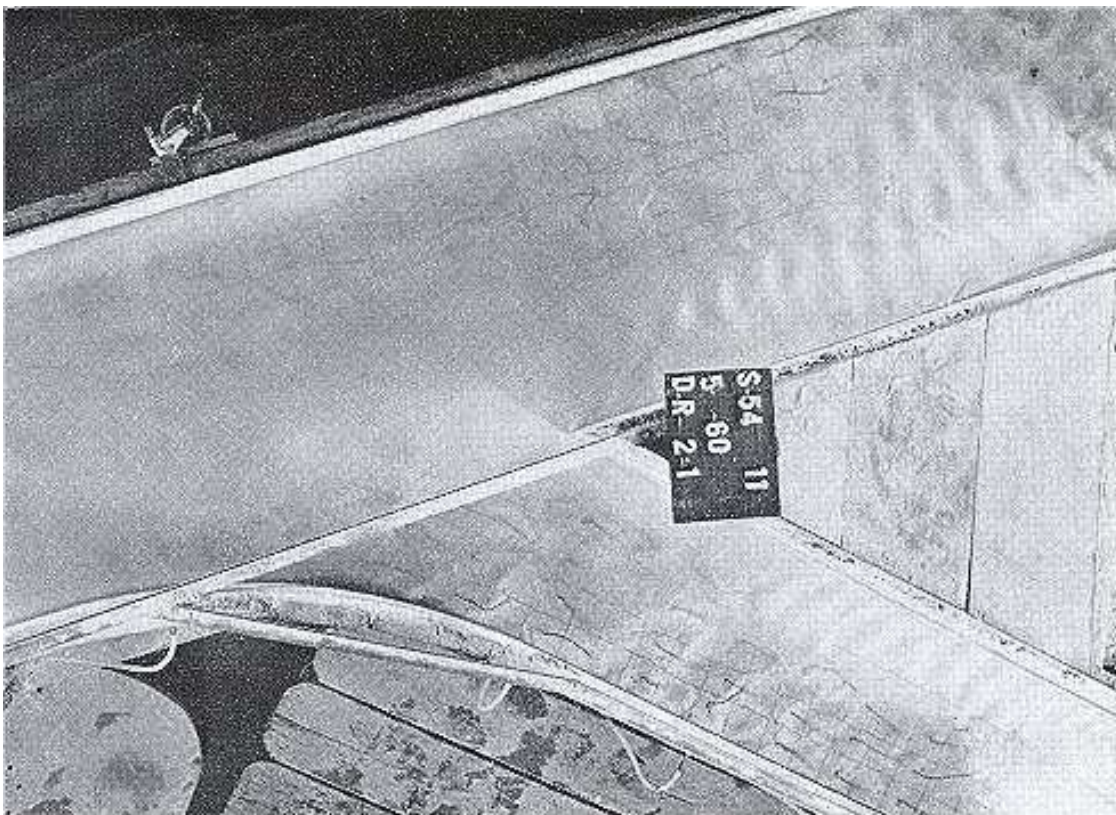
Riad heeft geprobeerd dit proces gedetailleerd weer te geven. Hiervoor heeft hij een experiment uitgevoerd voor het sedimenttransport totdat dit in evenwicht was. De vorm van de bodem in de evenwichtssituatie is daarna vastgelegd met beton. Op deze bodem heeft hij de stroming in beeld gebracht door stukjes touw aan één uiteinde vast te lijmen aan de bodem van de stroomgoot. De stroming bij de bodem en bij de waterspiegel heeft hij verder weergegeven met behulp van oplosbare kleurstoffen die naar gelang hun gewicht dicht bij de bodem of de waterspiegel bleven, zie Fig. 2.9.



2.9a: Verduidelijking stroombeeld bij bodem met behulp van stukjes touw. De touwtjes zijn aan één uiteinde vastgelijmd aan de bodem.



2.9b: Verduidelijking stroombeeld bij bodem met behulp van kleurstof (donkere kleur).



2.9c: Verduidelijking stroombeeld bij waterspiegel met behulp van kleurstof (lichte kleur).

Figuur 2.9: Verduidelijking stroombeeld bij bodem en waterspiegel (Riad [1961]).

In Fig. 2.9a is te zien dat de stroming zich bij de bodem vrij abrupt afbuigt naar de nevengeul. Afgezien van enkele stukjes touw die door bijvoorbeeld wervelingen anders gericht zijn, volgen de stukjes touw ter plaatse van het splitsingspunt vrij goed de sterke afbuiging zoals getekend in Fig. 2.5b. Ter plaatse van de splitsingskop is in de hoofdgeul te zien dat de stroming bij de bodem nog gekromd is naar de nevengeul. Verder benedenstrooms heeft de stroming bij de bodem weer de richting van de hoofdgeul. De neervorming aan de bovenstroomse oever in de nevengeul blijkt niet uit de richting van de stukjes touw op die plek, toch lijkt de stroming bij de benedenstroomse oever van de nevengeul sterker dan bij de rechteroever door een ruwer wateroppervlak.

In Fig. 2.9b is te zien dat de stroming aan de bodem bij de rechteroever van de moedergeul bij het betreden van de nevengeul aan de bovenstroomse oever blijft. Daarna lijkt de stroming zich bij de bodem over de gehele breedte te verspreiden, waarschijnlijk door loslating van de stroming van de rechteroever van de nevengeul.

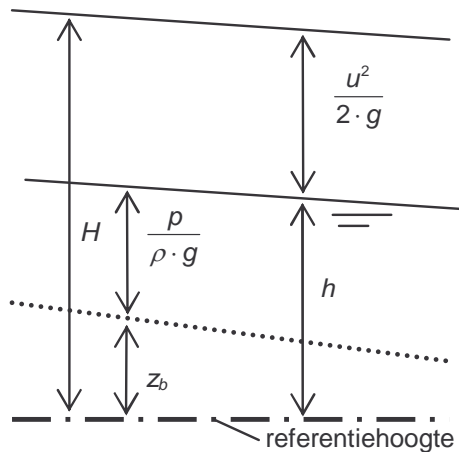
Fig. 2.9c laat de stroming bij de waterspiegel zien. De aanwezigheid van kleurstof leidt er toe dat het water troebel wordt. Als nu Fig. 2.9c wordt bekeken, lijkt het erop alsof de gehele stroming zich in eerste instantie met behoud van breedte laat meezuigen richting de splitsingskop. Het debiet naar de hoofdgeul verspreidt zich voorbij de splitsingskop snel over de gehele breedte van de hoofdgeul. Het debiet voor de nevengeul blijft dicht bij de linkeroever en verspreidt zich pas na een bepaalde afstand over de gehele breedte.

Over de invloed van de afronding van de oeverknik, kan het volgende worden opgemerkt: de touwtjes in Fig. 2.9a en de kleurstof in 2.9b laten zien dat de stroming bij de bodem aan de bovenstroomse oever van de nevengeul in benedenstroomse richting gaat. Verder stroomt de kleurstof in Fig. 2.9c duidelijk bij de benedenstroomse oever. Dit kan betekenen dat afronding van de oeverknik de neervorming het meest beïnvloedt bij de bodem. Riad merkte overigens op dat zijns inziens de straal van de afronding bij zijn experimenten te klein was.

Riad heeft de statische hoogte bij de bodem en bij de waterspiegel gemeten. Dit kan worden gedaan met behulp van de wet van Bernouilli, zie Vergelijking (2.4) en Fig. 2.10:

$$\begin{aligned}
 H &= h + \frac{u^2}{2 \cdot g} && \text{wet van Bernouilli} && (2.4) \\
 &= z_b + \frac{p}{\rho_w \cdot g} + \frac{u^2}{2 \cdot g}
 \end{aligned}$$

Hierin is:	H	energiehoogte	[m]
	h	piëzometrisch niveau = statische hoogte	[m]
	z_b	hoogte ten opzichte van referentiehoogte = plaatshoogte	[m]
	p	druk	[Pa]
	ρ_w	dichtheid water = 1.000	[kg/m ³]
	g	versnelling van de zwaartekracht = 9,81	[m/s ²]
	$\frac{p}{\rho_w \cdot g}$	drukhoogte	[m]
	$\frac{u^2}{2 \cdot g}$	snellheidshoogte	[m]



Bij de bodem is de plaatshoogte $z_b = 0$, zodat de statische hoogte alleen bestaat uit de drukhoogte $\frac{p}{\rho_w \cdot g}$. Bij de

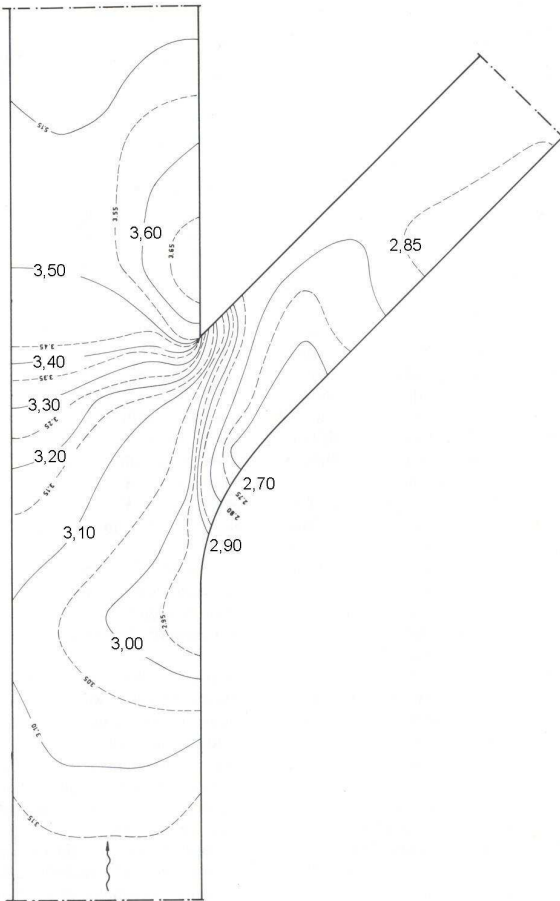
waterspiegel is de druk $p = 0$, zodat de statische hoogte bij de waterspiegel alleen bestaat uit de plaatshoogte z_b .

In Fig. 2.11 zijn de tekeningen te zien van de statische hoogte bij de bodem en bij de waterspiegel. De lengte van de goten is zo klein dat energieverlies kan worden verwaarloosd en de energiehoogte H constant kan worden beschouwd in langsrichting. Het weergeven van de statische hoogte h geeft dus impliciet ook het verloop van

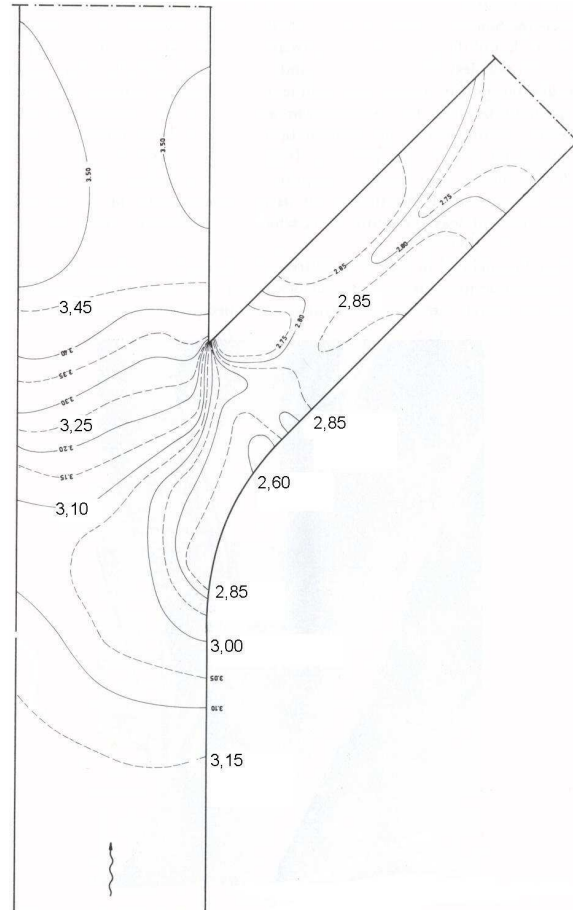
de grootte van de snelheidshoogte $\frac{u^2}{2 \cdot g}$ weer.

Aan het verloop van de snelheidshoogte kan worden gezien waar de stroming vertraagt en/of

versnelt. Een vergroting van de statische hoogte duidt dus op een verlaging van de snelheid u . In beide figuren is te zien dat de statische hoogte in benedenstroomse richting bij de oever van het splitsingspunt in de moedergeul en de bovenstroomse oever van de nevengeul eerst afneemt en vervolgens weer stijgt. Bij de oeverknik is de statische hoogte het laagst. Aan de andere zijde van die geulen is de statische hoogte groter, wat duidt op een verval in dwarsrichting. De statische hoogte stijgt bij het betreden van zowel de hoofdgeul als de nevengeul minder snel bij de bodem dan bij de waterspiegel. Dit betekent dat daar de snelheidsafname bij de bodem kleiner is dan bij de waterspiegel.



2.11a: Verloop statische hoogte bij waterspiegel.



2.11b: Verloop statische hoogte bij bodem.

Figuur 2.11: Verloop statische hoogte bij experimenten van Riad [1961].

Het debiet en het verhang werden tijdens de proeven zo laag gehouden dat er alleen bodemtransport plaatsvond.

2.3.2. Overzicht experimenten Riad

Voor een overzicht van de experimenten die Riad heeft uitgevoerd, zie Tabel 2.5. Voor een korte beschrijving van de resultaten, zie Tabel 2.6:

Tabel 2.5: Overzicht experimenten Riad.

onderzoeksdoel	vorm bodem	vaste parameter	variërende parameter	bereik variërende parameter	nr.
sedimentverdeling			Q_m, Q_s, Q_b	60,5 – 111,3 m ³ /s	R1
	bodemruwheid		vaste bodem, D, Δ	8 i.p.v. 0,38 mm 0,3 i.p.v. 1,65	R2
	locatie en richting drijvende vinnen		Q , hoek vin, afstand vanaf splitsingspunt	65,6 – 75,9 m ³ /s 15° – 45°	R3
	afmetingen vinnen	hoek, plaats en dimensies vin	Q	72,5 – 75,5 m ³ /s	R4
	meerdere vinnen	hoek, plaats en dimensies vin	Q	75,5 – 76,1 m ³ /s	R5

Tabel 2.6: Korte beschrijving resultaten experimenten Riad.

nr.	resultaat
R1	grover sediment in nevengeul dan in hoofdgeul, kleinere waarde voor q_s/q_b geeft meer sediment naar de nevengeul.
R2	kleine Q: relatief meer sediment naar nevengeul, grote Q: relatief minder sediment naar nevengeul.
R3	water bij waterspiegel wordt richting nevengeul geduwd. Relatief minder sediment naar nevengeul.
R4	kleinere hoek vin en kleinere afstand vanaf splitsingspunt: relatief meer sediment naar nevengeul.
R5	meer vinnen: minder sediment naar nevengeul.

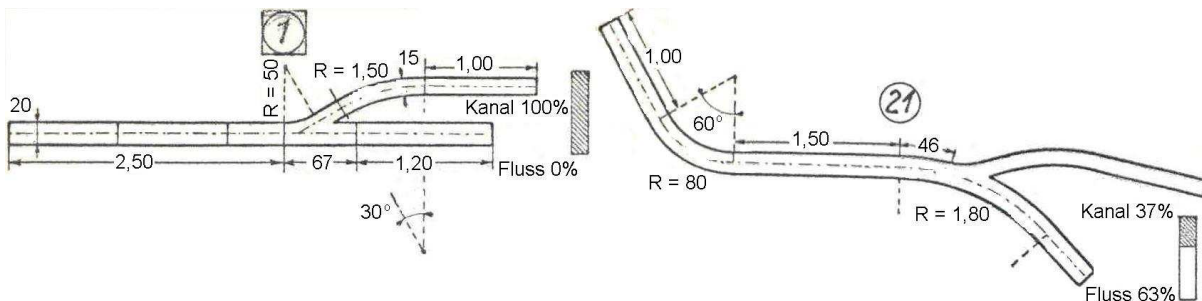
Hierin is: D korreldiameter sediment [mm]
 Δ relatieve dichtheid sediment onder water [-]
 $= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$
 ρ_s dichtheid sediment [kg/m³]
 $= 2.650$

2.4. Habermaas

De experimenten van Habermaas [1935] waren gericht op het bepalen van de invloed van de geometrie van de geulen op de sedimentverdeling. In de proefopstellingen werd een vaste bodem toegepast. De geometrie van de geulen werd op de volgende manieren gevarieerd:

- hoek van afsplitsing α (lokale kromming);
- kromming moedergeul en hoofdgeul (globale kromming);
- afstand tussen einde globale kromming en afsplitsing nevengeul;
- afstand tussen begin globale kromming en afsplitsing nevengeul;
- zijde van de globale kromming waarvan de nevengeul zich afsplitst (binnen- of buitenkant kromming).

Voor de duidelijkheid zijn in Fig. 2.12 twee voorbeelden gegeven van proefopstellingen.



Figuur 2.12: Twee voorbeelden van proefopstellingen bij de experimenten van Habermaas (Habermaas [1935]).

De experimenten zijn uitgevoerd met een vaste bodem, net als bij de experimenten van Bulle. Een figuur met alle proefopstellingen en de resultaten van de experimenten zijn opgenomen in Bijlage A. Uit de experimenten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- een grotere verhouding $\frac{Q_s}{Q_b}$ leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$;
- een sterkere lokale kromming geeft een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$. De lokale kromming is de hoek van afsplitsing α ;
- afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$. De globale kromming is de kromming van de moedergeul;

- een grotere afstand vanaf het einde van de globale kromming leidt tot een kleinere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$;
- een sterkere globale kromming met afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$;
- een grotere afstand vanaf het begin van de globale kromming met afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$.

2.5. Kwalitatieve beschrijving water- en sedimentbeweging aan de hand van Bulle en Riad

Aan de hand van de beschrijvingen van de resultaten van Bulle en Riad kan Fig. 2.13 worden geschetst.

2.5.1. Globale waterbeweging

De globale waterbeweging beschrijft de debietverdeling over de breedte ten gevolge van de vorm van de moedergeul. Deze blijkt overeen te komen met de primaire stroming ter plaatse van het splitsingspunt. De verdeling van de primaire stroming over de hoofd- en nevengeul en de ligging van de scheidingslijn kan worden verklaard met het evenwichtsdebiet, zie Vergelijking (2.5):

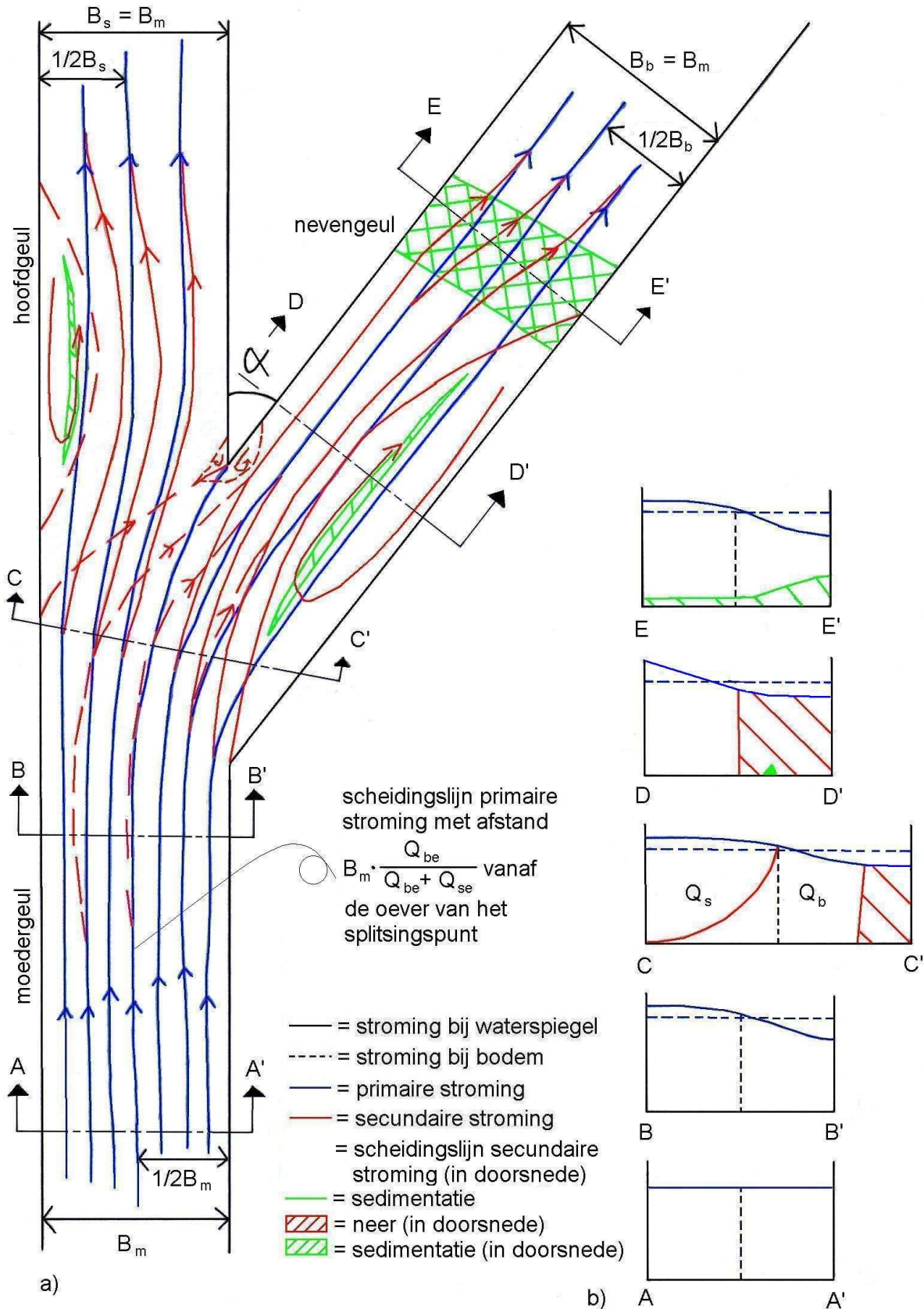
$$Q_e = C \cdot B \cdot h \cdot \sqrt{R_h \cdot i} \quad (2.5)$$

Hierin is: e evenwichtswaarde behorende bij geometrie geul

Hieruit volgt eenvoudig dat de scheidingslijn van de primaire stroming een afstand $B_m \cdot \frac{Q_{be}}{Q_{be} + Q_{se}}$ vanaf de oever van het splitsingspunt in de moedergeul ligt.

2.5.2. Lokale waterbeweging

De lokale waterbeweging bestaat uit de waterbeweging ten gevolge van de secundaire stroming en secundaire effecten. Hierin is de secundaire stroming is de afwijking van de feitelijke stroming van de primaire stroming, zoals gedefinieerd aan het begin van dit hoofdstuk. Een secundair effect is bijvoorbeeld de invloed van de dwarshelling van de bodem.



Figuur 2.13: Stroombeeld in een rechte geul met afsplitsende geul met dezelfde breedte (naar Bulle [1926] en Riad [1961]). De dwarsdoorsneden zijn getekend aan de hand van Fig. 2.5, Fig. 2.11 en 2.13a).

Hierin is: Q_{se} evenwichtsdebiet in hoofdgeul
 Q_{be} evenwichtsdebiet in nevengeul

$[m^3/s]$
 $[m^3/s]$

Waterbeweging:

Onder invloed van het verval wordt een deel van het debiet gedwongen naar de nevengeul te gaan. In § 2.3.1 is uitgelegd dat door de traagheid van het water en onder invloed van de zwaartekracht het debiet bij de bodem naar de nevengeul wordt geduwd. Dit resulteert in een spiraalstroming. De spiraalstroming heeft effect op de ligging van de scheidingslijn van het debiet dat naar de hoofdgeul gaat en het debiet dat naar de nevengeul gaat. In Fig. 2.13 ligt de scheidingslijn van de secundaire stroming bij de waterspiegel op dezelfde plaats als de scheidingslijn van de primaire stroming. Deze lijn zou ook dichter bij of verder van het splitsingspunt af kunnen liggen. Dit is afhankelijk van de grootte van de neer en de dikte van de laag bij de bodem van het debiet dat naar de nevengeul gaat. Voorwaarde is dat er continuïteit is, zie ook Fig. 2.5c.

De traagheid van het water heeft nog andere gevolgen, namelijk neervorming aan de bovenstroomse oever van de nevengeul. Een neer ontstaat bij een hoek van afsplitsing α waarvoor geldt $\tan \alpha > \frac{1}{8}$ of $\alpha > 7^\circ$ (Battjes [1999]). Als het water aan komt stromen bij het splitsingspunt, zal het door traagheid de neiging hebben zijn bestaande weg te vervolgen. Pas als er al enige tijd een vergroting van de breedte is, past het water zich aan de lokale verstoring aan en gaat een deel van het water de nevengeul in. Door de traagheid in het afbuigen naar de nevengeul, ontstaat er een neer aan de bovenstroomse oever van de nevengeul. De breedte van de neer is ongeveer $\frac{1}{2} \cdot B_b$, afhankelijk van de hoek van afsplitsing.

In de hoofdgeul ontstaat er een kleine neer, namelijk net benedenstrooms van het splitsingspunt aan de oever tegenover de splitsingskop. Deze neer ontstaat doordat de stroomsnelheid zich nog niet heeft aangepast aan het kleinere debiet bij dezelfde breedte en er water wordt onttrokken van de moedergeul naar de nevengeul. Bij het naderen van het splitsingspunt wordt de gehele stroming beïnvloed door de secundaire stroming en buigt af richting de nevengeul. Het deel van het debiet dat naar de hoofdgeul gaat, ondervindt benedenstrooms van het splitsingspunt geen invloed meer van de middelpuntvliedende kracht F_{mv} en de drukkracht F_p , maar stroomt wel naar de oever van het splitsingspunt van de hoofdgeul. Om het debiet gelijkmatig te verdelen over de breedte van de hoofdgeul, ontstaat er een spiraalstroming die tegengesteld gericht is aan de spiraalstroming bij het splitsingspunt. Verder ontstaat er bij de bodem een kleine neer bij de splitsingskop, die zich afwisselend in de hoofdgeul en de nevengeul bevindt. Door deze neer ontstaat er ontgronding bij de splitsingskop. Voor de plaats van de neren, zie Fig. 2.13a.

In eerste instantie zal vergroting van de hoek van afsplitsing α of het debiet in de moedergeul leiden tot een grotere neer in de nevengeul en een gelijkblijvende debietverdeling over de twee geulen. Een verdere vergroting van het debiet of de hoek van afsplitsing, leidt tot een groter debiet naar de hoofdgeul, die rechtdoor gaat. Voor de verklaring van het ontstaan van een scheve debietverdeling bij een groter debiet, moet het verval in dwarsrichting en de energiehoogte H ter plaatse van het splitsingspunt worden betrokken.

In Fig. 2.13b is te zien dat, kijkend van drsn. $A-A'$ naar drsn. $E-E'$, het verval in dwarsrichting eerst toeneemt en dan weer afneemt met het maximum tussen drsn. $C-C'$ en drsn. $D-D'$. Als het debiet in de moedergeul groter wordt, neemt de snelheid toe. Op het splitsingspunt krijgt het debiet een grotere breedte ter beschikking en zal onder invloed van het verval een deel van het debiet afbuigen naar de nevengeul. Door de grotere snelheid van het water, bezit het water een grotere impuls en zal het langer dueren voordat het water wordt afgebogen naar de nevengeul: het water moet over een kleinere afstand worden afgebogen en de neer in de nevengeul krijgt een grotere breedte dan bij een kleiner debiet. Bij een grotere hoek van afsplitsing α vindt een soortgelijk proces plaats. Bij gelijkblijvend debiet en vergroting van de hoek van afsplitsing α moet de stroming sterker worden afgebogen. Bovendien neemt door de grotere hoek van afsplitsing α de toegangsbreedte B_b van de nevengeul af.

Als gevolg van de grotere breedte van de neer in de nevengeul, wordt de stroomvoerende breedte A kleiner. Om het grotere debiet in de nevengeul af te kunnen voeren, zal bij gelijkblijvende energiehoogte

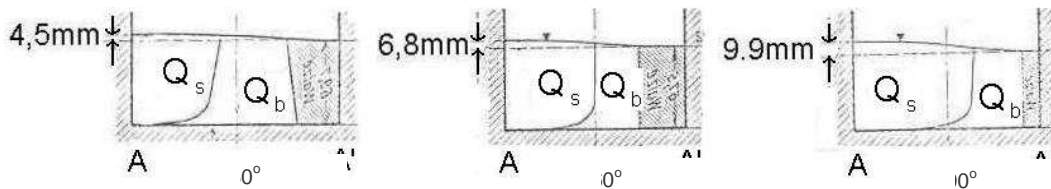
H de snelheidshoogte $\frac{u^2}{2 \cdot g}$ moeten toenemen en het piëzometrische niveau h moeten afnemen. De

forcering voor het groter worden van de snelheidshoogte wordt geleverd door het evenwichtsdebiet in de nevengeul Q_{be} . Deze forcering kan worden omschreven als een "zuigkracht" van de nevengeul om debiet aan te trekken. Om vergroting van de snelheidshoogte mogelijk te maken, moet de middelpuntvliedende kracht F_{mv} groter worden. Dit gebeurt in de vorm van een groter verval in dwarsrichting ter plaatse van het

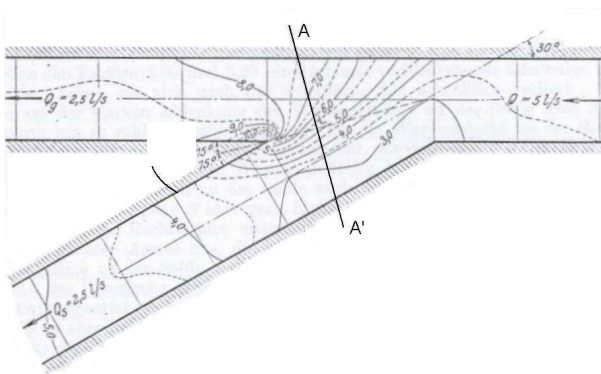
splitsingspunt. Het verval in dwarsrichting levert in de vorm van de drukkracht F_p de aandrijvende kracht om water de nevengeul in te duwen. Op een gegeven moment is het benodigde verval in dwarsrichting voor een gelijkblijvende debietverdeling te groot. Er ontstaat een ongelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul. Deze situatie blijkt samen te vallen met het optreden van schietend water in de nevengeul ($Fr > 1$).

Het in stand houden van de gelijke debietverdeling, ondanks een grotere neer in de nevengeul, duidt er op dat de grootte van de neer geen invloed heeft op de debietverdeling, maar dat deze met name wordt bepaald door de evenwichtsdebieten van de hoofd- en nevengeul.

In Fig. 2.14 is het verval in dwarsrichting weergegeven ter plaatse van het splitsingspunt voor drie verschillende waarden van de hoek van afsplitsing α .

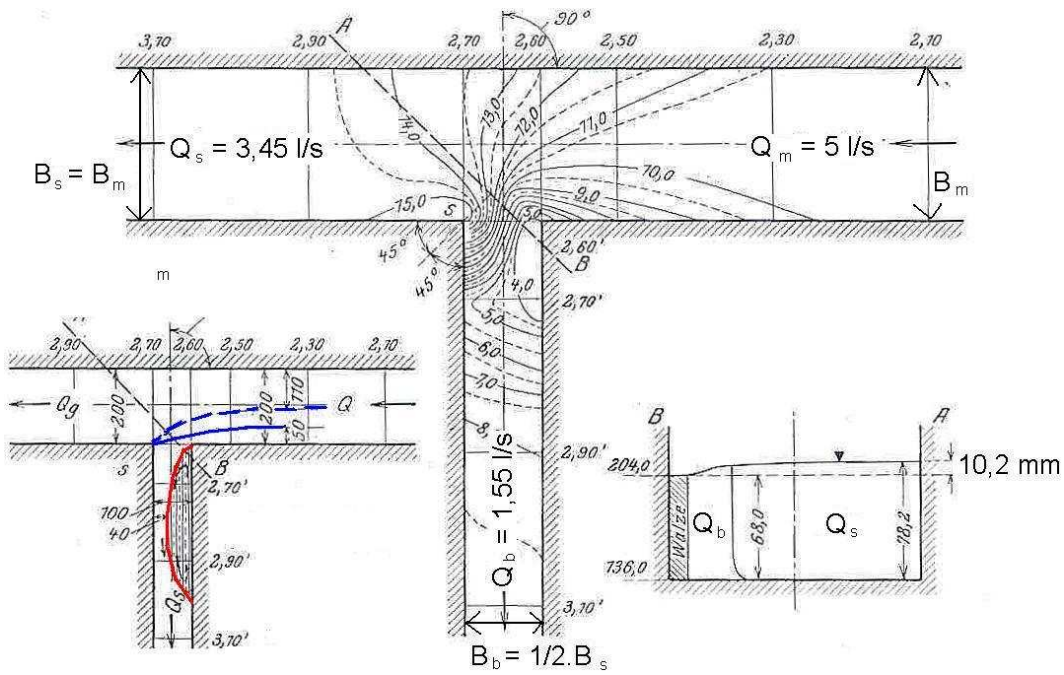


2.14a: Dwarsdoorsnede A-A'.

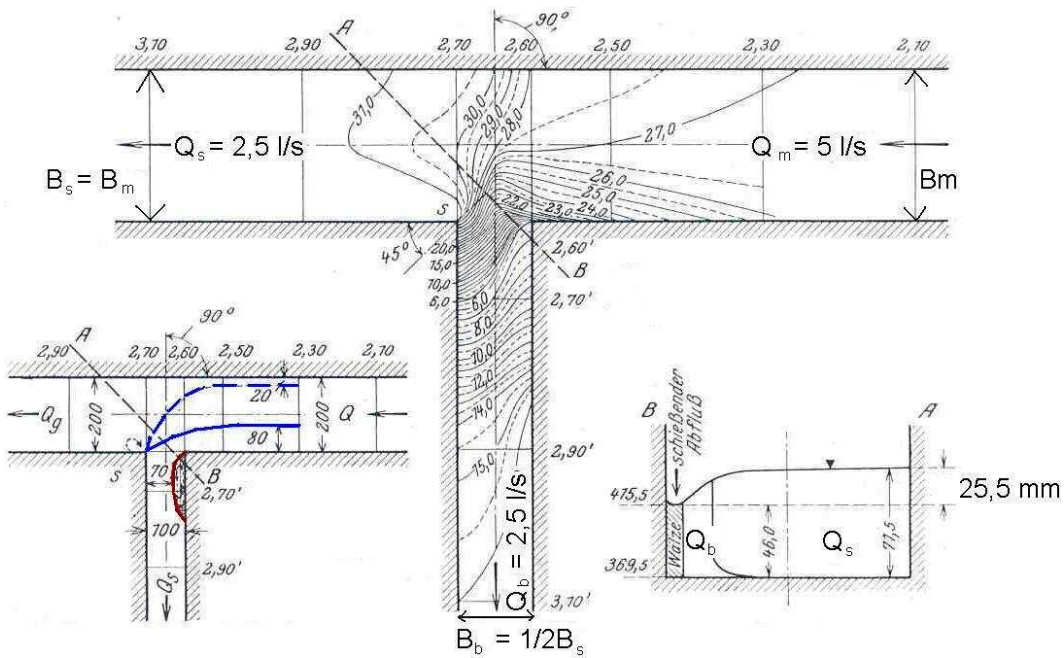


2.14b: Indicatie plaats van dwarsdoorsnede A-A'. Als voorbeeld is de plaats van de dwarsdoorsnede bij $\alpha = 30^\circ$ weergegeven.

Figuur 2.14: Verval in dwarsrichting bij verschillende hoeken van afsplitsing α (30° , 60° en 90°). Een grotere hoek van afbuiging leidt tot een groter verval in dwarsrichting (Bulle [1926]).



2.15a: Stroombeeld en verval in dwarsrichting bij gelijkblijvende benedenstroomse waterstand en halvering van de breedte van de nevengeul.



2.15b: Stroombeeld en verval in dwarsrichting bij forcering van een gelijke debietverdeling en halvering van de breedte van de nevengeul.

In Fig. 2.15 zijn twee situaties weergegeven waarbij de debietverdeling is gemanipuleerd. In deze figuur geldt $B_b = \frac{1}{2} \cdot B_s$. Bij gelijke benedenstroomse waterstand geldt de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{3,45}{1,55} = 2,23$, zie

Fig. 2.15a. Als de benedenstroomse waterstand in de nevengeul zo wordt gemanipuleerd dat voor de debietverdeling geldt $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{2,5}{2,5} = 1$, is het stroombeeld zoals in Fig. 2.15b. Hierin is te zien dat het debiet

bij de bodem in de moedergeul bijna geheel naar de nevengeul gaat, dat de afmetingen van de neer sterk zijn afgenomen en dat het verval in dwarsrichting ter plaatse van het splitsingspunt 2,5 keer zo groot is geworden.

In Tabel 2.7 is een beschrijving gegeven van de gevolgen van verandering van parameters.

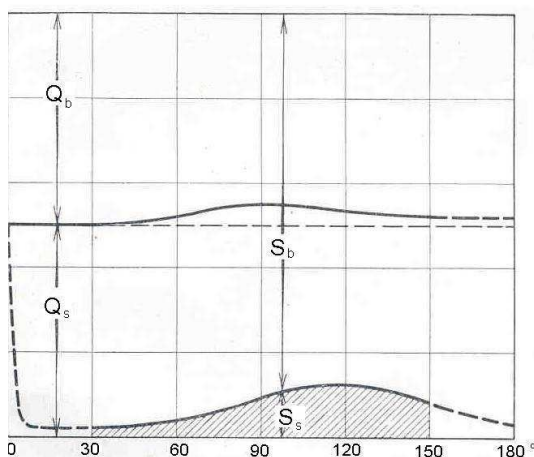
Tabel 2.7: Gevolgen van de verandering van parameters voor de waterbeweging.

parameter	verandering	gevolg
Q	vergroting	door vergroting van Q heeft de stroming een grotere impuls, waardoor het langer duurt voordat de stroming wordt afgebogen naar de nevengeul. Hiervoor is een groter verval in dwarsrichting t.p.v. het splitsingspunt nodig. Op een gegeven moment is het benodigde verval in dwarsrichting te groot en gaat het extra debiet naar de hoofdgeul. De neer in de nevengeul wordt kleiner. De stroming benadert in deze situatie de toestand van schietend water ($Fr > 1$).
α	vergroting $30^\circ \rightarrow 90^\circ$, verkleining $150^\circ \rightarrow 90^\circ$	$\tan \alpha > 1/8$ ($\alpha > 7^\circ$): neervorming aan de bovenstroomse oever van de nevengeul.
		door vergroting van α moet de stroming sterker worden afgebogen. Hiervoor is een sterker verval in dwarsrichting t.p.v. het splitsingspunt nodig. Op een gegeven moment is het benodigde verval in dwarsrichting te groot en gaat er een relatief groter debiet naar de hoofdgeul. De neer in de nevengeul wordt dan kleiner. De stroming benadert in deze situatie de toestand van schietend water ($Fr > 1$).
		effectieve toegangsbreedte $B_b' = \frac{B_b}{\sin \alpha}$ neemt af. Dit betekent dat het debiet over een kleinere afstand de nevengeul kan betreden. Bij gelijkblijvend debiet heeft de stroming dezelfde traagheid en zal de neer in de nevengeul een grotere lengte en breedte krijgen.
B	vergroting	bij gelijkblijvend debiet en benedenstroomse waterstand neemt de snelheid u af. Bij gelijkblijvende energiehogte H betekent dit een vergroting van de waterdiepte.
afroning oeverknik	van spits naar afger. oeverknik	bij afronding van de oeverknik wordt de stroming geleidelijker met een vergroting van de breedte geconfronteerd. Het water past zich beter aan aan de veranderde situatie en de neer in de nevengeul wordt kleiner.

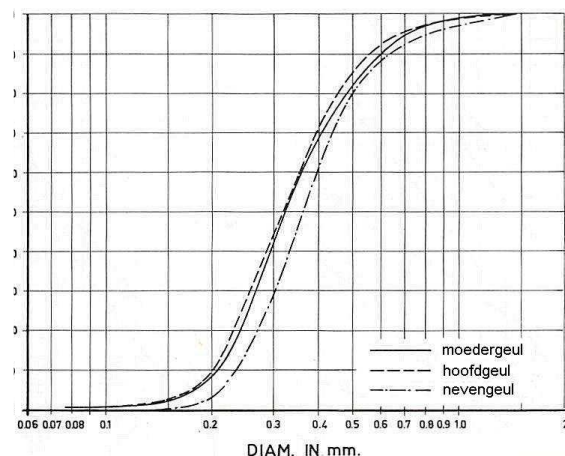
Sedimentbeweging:

De sedimentbeweging volgt de waterbeweging. Uit de sedimentverdeling over de diepte, weergegeven in Fig. 2.3, blijkt dat het meeste en grovere sediment zich bij de bodem bevindt. Het debiet bij de bodem gaat voor het grootste deel de nevengeul in. Dit betekent dat het grootste deel van het sediment naar de

nevengeul gaat en dat de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b}$ groter is dan de verhouding $\frac{S_s}{S_b}$. Dit wordt het Bulle-effect genoemd, zie ook Fig. 2.16 en Fig. 2.17.



Figuur 2.16: Debit- en sedimentverdeling bij $Q_m = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bulle [1926]).



Figuur 2.17: Zeefkrommen van het sediment in de moeder-, hoofd- en nevengeul (Riad [1961]).

Aan het begin van de nevengeul bevindt zich een neer aan de bovenstroomse oever. Hierdoor geldt dat $\frac{Q_m}{B_m} = \frac{Q_b}{B_b}$. Stroomafwaarts in de nevengeul wordt de neer kleiner en verdwijnt deze. De verhouding $\frac{Q_b}{B_b}$

wordt kleiner, de stroomsnelheid daalt en er vindt sedimentatie plaats, zie Fig. 2.13.

Ter plaatse van een neer is de stroomsnelheid lager dan in de rest van de geul. Door de retourstroom is er zelfs een plek waar de snelheid gelijk aan nul is. Op deze plaats zal dan ook sedimentatie plaatsvinden, zie Fig. 2.13. Bulle en Riad merken hierover op dat de sedimentatie ter plaatse van een neer zich uitbreidt over de gehele breedte van de nevengeul. Volgens Riad gebeurt dit doordat het sediment op de zelfde plaats blijft neerslaan en er daar een zandhoop ontstaat. Zandkorrels glijden van de helling van deze zandhoop naar beneden en verspreiden zich zo over de gehele breedte van de nevengeul.

Volgens Bulle ontstaat er een cyclisch proces: sedimentatie van de bodem heeft stijging van de waterspiegel tot gevolg, waardoor het verval in dwarsrichting afneemt en q_b en s_b dalen. Op de plek in de nevengeul met de sterkste sedimentatie, stijgt de bodemhoogte het meest. Door de gunstigere energieverdeling bij een gelijkblijvende verhouding $\frac{Q_b}{Q_s}$ en verkleining van de dwarsdoorsnede van de

nevengeul, moet de neer kleiner worden. Bij gelijkblijvende Q_b neemt op de plaats van de neer de stroomsnelheid toe. Hierdoor wordt het neergeslagen sediment aan het begin van de nevengeul stroomafwaarts meegesleurd. Tegelijkertijd is de grootte van de neer afgenomen. Ter plaatse van de neer wordt de stroomsnelheid ook groter en erodeert het sediment.

Erosie in de nevengeul heeft een grotere dwarsdoorsnede tot gevolg. Het verval in dwarsrichting op het splitsingspunt neemt toe, q_b en s_b stijgen, de neer wordt groter en er vindt weer sedimentatie plaats op de grens van de neer en stroomafwaarts daarvan.

Uitgaande van de beschrijving van de waterbeweging en de resultaten van Bulle en Riad wordt er een korte beschrijving gegeven van de gevolgen van de verandering van parameters in Tabel 2.8.

Tabel 2.8: Gevolgen van de verandering van parameters voor de sedimentbeweging.

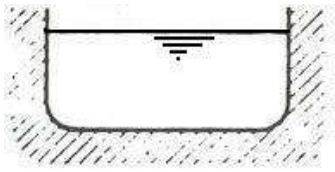
parameter	verandering	gevolg
Q	vergroting	vergroting van het debiet Q leidt tot een relatief groter debiet naar de hoofdgeul. Als gevolg hiervan zal er meer sediment naar de hoofdgeul gaan, zodat de sedimentverdeling over de hoofd- en nevengeul groter wordt.
α		tan $\alpha > 1/8$ ($\alpha > 7^\circ$): neervorming aan de bovenstroomse oever van de nevengeul. De breedte van deze neer is ongeveer $\frac{1}{2} \cdot B_b$, zodat geldt $\frac{Q_m}{B_m} = \frac{Q_b}{B_b}$. Hierdoor vindt er aan het begin van de nevengeul geen sedimentatie plaats. Stroomafwaarts in de nevengeul verdwijnt de neer en vindt er sedimentatie plaats.
	vergroting $30^\circ \rightarrow 120^\circ$ verkleining $150^\circ \rightarrow 120^\circ$	door vergroting van α gaat er op een gegeven moment een relatief groter debiet naar de hoofdgeul. Een deel hiervan is het sedimentrijke debiet bij de bodem. Hierdoor neemt het transport van sediment naar de nevengeul af. door vergroting van α neemt de effectieve toegangsbreedte $B_b' = \frac{B_b}{\sin \alpha}$ af. Bij gelijkblijvend debiet heeft de stroming dezelfde traagheid en zal de neer in de nevengeul een grotere lengte en breedte krijgen. In vergelijking met een kleinere hoek van afsplitsing α vindt er stroomafwaarts sedimentatie plaats.
B	vergroting	bij gelijkblijvend debiet en benedenstroomse waterstand neemt de snelheid u af. Dit betekent dat de stroming een kleinere sedimenttransportcapaciteit heeft en er dus vergeleken met een kleinere breedte stroomopwaarts sedimentatie plaatsvindt.
<i>afronding oeverknik</i>	van spits naar afger. oeverknik	bij afronding van de oeverknik wordt de stroming geleidelijker met een vergroting van de breedte geconfronteerd. Het water past zich beter aan aan de veranderde situatie en de neer in de nevengeul wordt kleiner. Hierdoor is de stroomvoerende breedte in de nevengeul eerder gelijk aan de breedte van de nevengeul en zal er vergeleken met een spitse oeverknik stroomopwaarts sedimentatie plaatsvinden.
t	verloop in de tijd	hypothese van Bulle: ter plaatse van een neer is een plek waar de gewone stroming en de retourstroming elkaar ontmoeten. Hier is de snelheid nul. Op die plaats zal sedimentatie optreden en er ontstaat daar een zandhoop. De waterspiegel stijgt en het verval in dwarsrichting t.p.v. het splitsingspunt neemt af. Hierdoor dalen q_b en s_b . Bij doorgaande sedimentatie zal zand van deze hoop naar beneden rollen en zich verspreiden over de gehele breedte van de nevengeul. Dit betekent dat het stroomvoerende profiel wordt vernauwd. Bij gelijkblijvende verhouding $\frac{Q_b}{Q_s}$, zal de neer kleiner worden. Op de plaats van de oorspronkelijke neer wordt de snelheid verhoogd en wordt het daar neergeslagen sediment stroomafwaarts meegesleurd. Erosie aan het begin van de nevengeul betekent een vergroting van het stroomvoerende profiel. Hierdoor stijgt het verval in dwarsrichting t.p.v. het splitsingspunt, q_b en s_b stijgen, de neer wordt groter en er vindt weer sedimentatie plaats op de grens van de gewone stroming en de retourstroming. Uit experimenten van Riad met een langere tijdsduur blijkt dat op de lange termijn er geen tijdseffect is.

2.5.3. Gekromde moedergeul

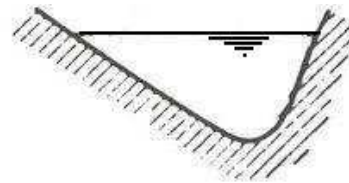
Bij het voorgaande is uitgegaan van een rechte moedergeul. Een moedergeul die een bocht maakt komt echter ook voor. De stroming in een bocht van een waterloop ondervindt ongeveer dezelfde krachten als de circulatiestroming bij een splitsingspunt, echter de breedte van de waterloop blijft constant over de lengte. Voor een beschrijving van het mechanisme circulatiestroming, zie p. 2.7 en Fig. 2.7 en 2.8.

De circulatiestroming veroorzaakt door de bocht in de moedergeul stelt de globale spiraalstroming voor. Een splitsingspunt is een lokale verstoring in de waterloop. De spiraalstroming veroorzaakt door het splitsingspunt is dus de lokale spiraalstroming. Bij het samenvallen van een bocht in de moedergeul en een splitsingspunt vindt er interactie plaats tussen de globale en lokale waterbeweging (Habermas [1935]).

In het geval van een rechte moedergeul is de helling in dwarsrichting verwaarloosbaar. Als de moedergeul gekromd is, vindt er in dwarsrichting een herverdeling van sediment plaats door de spiraalstroming, waardoor er relatief grover sediment in de buitenbocht ligt dan in de binnenbocht. De dwarsdoorsnede is in evenwicht als de resultante van de stromingskrachten, die het sediment tegen de bodemhelling op omhoog transporteren, in evenwicht is met de zwaartekracht. De dwarsdoorsnede van de moedergeul krijgt dan de vorm zoals in Fig. 2.18:



2.18a: Dwarsdoorsnede rechte geul.



2.18b: Dwarsdoorsnede gekromde geul.

Figuur 2.18: Schets vorm dwarsdoorsnede bij rechte en gekromde geul (Akkerman [1993]).

De bodem is in evenwicht als de zwaartekracht even groot is als de stromingskrachten. Gevolg van de nieuwe dwarsdoorsnede is dat de primaire stroming qua volume niet meer gelijkmatig over de breedte is verdeeld. De scheidingslijn van de primaire stroming ligt dan niet meer een afstand $B_m \cdot \frac{Q_{be}}{Q_{be} + Q_{se}}$ vanaf de oever van het splitsingspunt in de moedergeul.

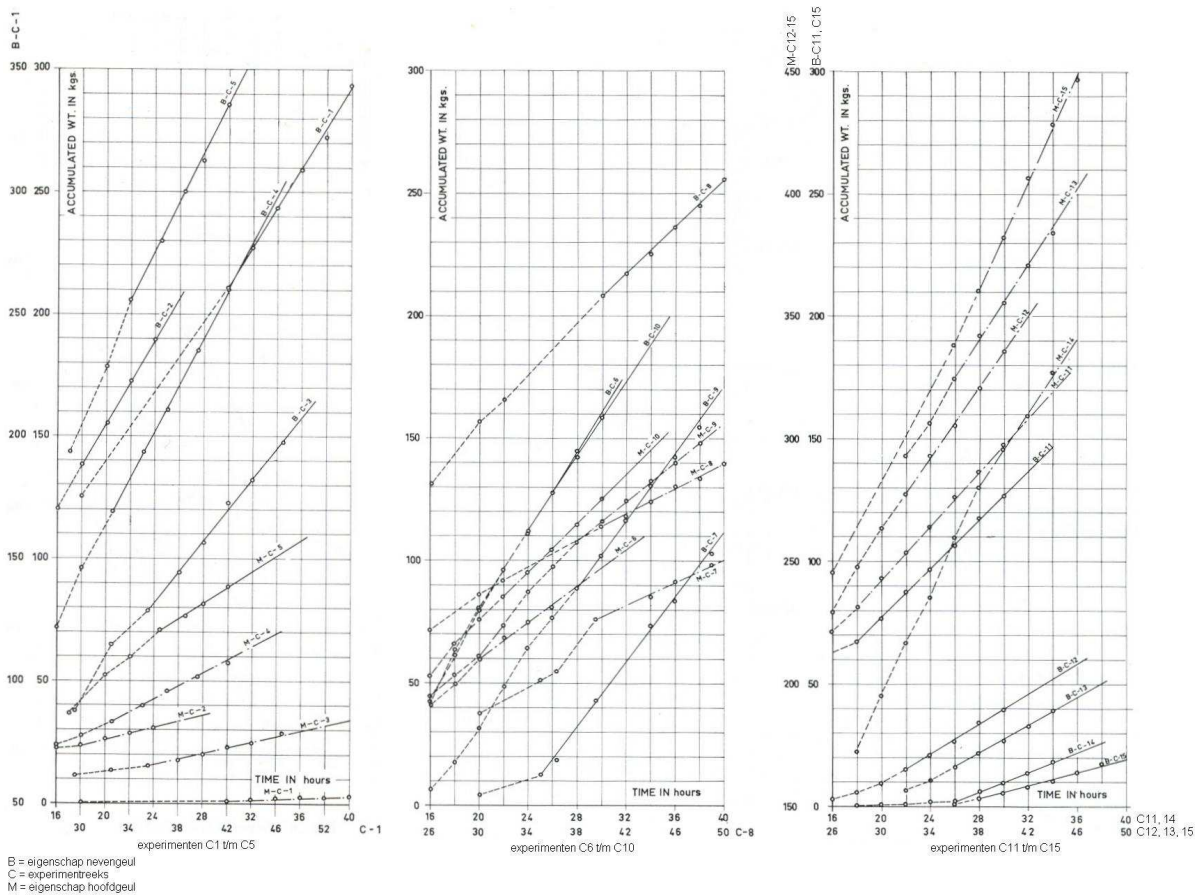
In het geval van een gekromde moedergeul kunnen zich twee situaties voordoen:

- indien de nevengeul zich aan de buitenkant van de bocht afsplitst, is de richting van de lokale spiraalstroming tegengesteld gericht aan de globale spiraalstroming. De lokale en globale spiraalstroming werken elkaar tegen. Er zal in vergelijking met een rechte moedergeul minder sediment naar de nevengeul gaan;
- indien de nevengeul zich aan de binnenkant van de bocht afsplitst, is de richting van de lokale spiraalstroming gelijk gericht aan de globale spiraalstroming. De lokale en globale spiraalstroming versterken elkaar. Er zal in vergelijking met een rechte moedergeul meer sediment naar de nevengeul gaan.

2.5.4. Tijdseffect

In § 2.2.2 is kort aandacht besteed aan het verloop van de sedimentbeweging in de tijd. Bulle stelde een hypothese op dat er een oscillerend proces optreedt, waarbij een drempel wordt gevormd en verwijderd aan het begin van de nevengeul. Deze drempel zorgt ervoor dat er relatief meer sediment naar de hoofdgeul gaat. Door de “zuigkracht” van het evenwichtsdebiet van de nevengeul en het kleinere dwarsprofiel, wordt de stroomsnelheid aan het begin van de nevengeul groter. Hierdoor erodeert de drempel en wordt de stroomsnelheid kleiner. Het sediment wordt niet langer verhindert naar de nevengeul te gaan en de oorspronkelijke sedimentverdeling herstelt zich. Hierna begint het proces van drempelvorming en –verwijdering opnieuw.

De proeven van Bulle duurden maximaal 75 min. Na 75 min. had zich een drempel gevormd aan het begin van de nevengeul. De proeven van Riad duurden tot 54 uur. Het opgevangen sediment in de tijd is te zien in Fig. 2.19. De lijnen in deze grafiek zijn recht, zodat kan worden geconcludeerd dat de sedimentverdeling over een groot tijdsbestek constant kan worden verondersteld en er dus geen aanwijzingen zijn dat er een cyclisch proces optreedt.



Figuur 2.19: Verloop van het opgevangen sediment in de tijd (Riad [1961]).

2.6. Kwantitatieve relaties in de literatuur

De literatuur van Bulle en Riad is het meest uitgebreid in de kwalitatieve beschrijving van de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt. Andere literatuur richt zich meer op het formuleren van een relatie, waarmee de sedimentverdeling bij een splitsingspunt kan worden bepaald. In deze paragraaf wordt die literatuur samengevat.

Akkerman [1993]:

Op basis van literatuurstudie heeft Akkerman aanbevelingen gedaan voor het ontwerpen van nevengeulen in de uiterwaarden. De bestudeerde literatuur betreft onderzoek naar sedimentverdeling bij splitsingspunten en ontwerpcriteria voor inlaten van bijvoorbeeld irrigatiekanalen. Hij concludeerde dat voor minimalisering van het bodemtransport naar de nevengeul de volgende ontwerpprincipes moeten worden gevolgd:

- afsplitsing van de nevengeul aan de buitenkant van de bocht van de moedergeul op enige afstand van het begin van de bocht. De spiraalstroming in de moedergeul heeft namelijk enige afstand nodig om zich te ontwikkelen;
- bodemligging van de nevengeul hoger dan de bodemligging van de moedergeul. Op deze manier gaat water uit de bovenkant van de waterkolom naar de nevengeul. Dit water bevat relatief minder en fijner sediment;
- zorg dragen voor een verhoudingsgewijs zo sterk mogelijke spiraalstroming door de bocht in de moedergeul ten opzichte van de spiraalstroming door de afsplitsing van de nevengeul. Dit kan door een klein debiet naar de nevengeul, een kleine hoek van afsplitsing en een goede stroomlijning van de afsplitsing.

In het geval van bodem- en suspensietransport, moet worden gekeken naar het aandeel van deze twee typen transport. Bodemtransport is afhankelijk van de richting van de bodemschuifspanning. Suspensietransport volgt in grote mate de primaire waterbeweging.

Akkerman concludeerde daarnaast dat er voor een bepaalde waarde van de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ geldt dat

$\frac{S_s}{S_b} = 1$. Voor een grotere waarde van de debietverdeling gaat er verhoudingsgewijs meer sediment naar

de hoofdgeul toe. Voor een kleinere waarde van de debietverdeling geldt het tegenovergestelde voor de sedimentverdeling.

El-Sayed [1995]:

El-Sayed heeft onderzoek gedaan naar de afsplitsing van een nevengeul en een scheidingsmuur in de moedergeul ter plaatse van het splitsingspunt, zie Fig. 2.20. Deze constructie wordt vaak toegepast voor het aftappen van irrigatiewater. Het gebruik van een scheidingsmuur kan worden gezien als een afsplitsing van een nevengeul met $\alpha = 0$. Hij deelde het sedimenttransport op in twee elementen. Een longitudinale component die het sedimenttransport door de primaire stroming berekent en afhankelijk is van de verhouding $\frac{Q_b}{Q_m}$. De transversale component

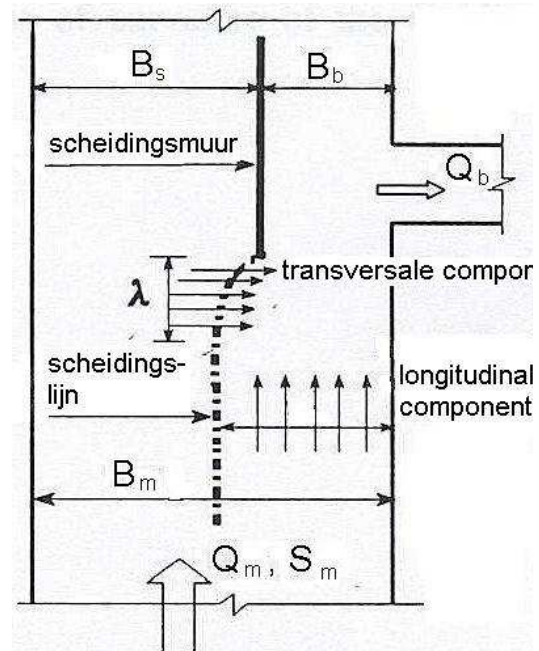
geeft het sedimenttransport weer ten gevolge van de secundaire stroming die wordt opgewekt ter plaatse van het splitsingspunt. Deze component bestaat uit het sediment dat over de verstoringlengte λ over de scheidingslijn wordt getransporteerd. Variatie in de bodemligging in dwarsrichting is weergegeven door een sinusoscillatie in de ruimte, zie Vergelijking (2.6):

$$h = h_0 + \hat{h} \cdot \cos \frac{\pi \cdot y}{B} \quad (2.6)$$

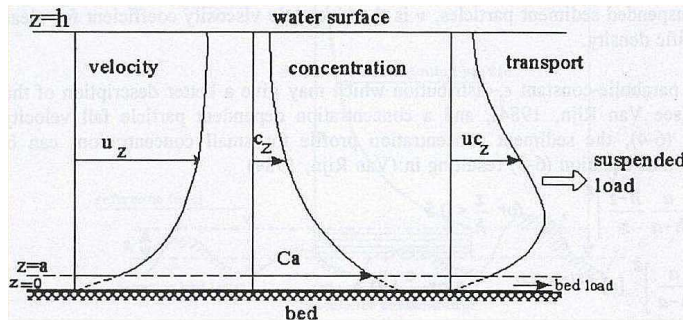
Hierin is:	h_0	gemiddelde waterdiepte	[m]
	\hat{h}	amplitude waterdiepte	[m]
	y	afstand in dwarsrichting	[m]

Het suspensietransport van de transversale component wordt berekend door de bruto waterverplaatsing over de scheidingslijn te bepalen en deze te koppelen aan het concentratieprofiel over de diepte. Uiteindelijk geldt voor het suspensietransport ten gevolge van de secundaire stroming Vergelijking (2.7), zie ook Fig. 2.21 en 2.22:

$$S_{tr} = \int_a^h c(z) \cdot v(z) dz \quad (2.7)$$



Figuur 2.20: Overzichtstekening splitsingspunt met scheidingsmuur (El-Sayed [1995]).



Figuur 2.21: Definitieschets suspensietransport (El-Sayed 1995). Figuur 2.22: Transversaal snelheidsprofiel (El-Sayed [1995]).

Hierin is:	S_{tr}	transversale suspensietransport	$[m^3/s]$
	a	hoogte boven bodem van de scheidingslijn tussen suspensietransport en bodemtransport	$[m]$
	c	sedimentconcentratie	$[m^3/m^3]$
	z	afstand in verticale richting	$[m]$
	v	snelheid in y -richting, dit is de dwarsrichting	$[m/s]$

2.7. Conclusies literatuurstudie

Uit de experimenten van Bulle en Riad en de literatuur waarin geprobeerd is een kwantitatieve relatie op te stellen voor de sedimentverdeling, kan worden geconcludeerd dat voor het formuleren van een splitsingspuntrelatie de volgende processen belangrijk zijn:

- voor de sedimentverdeling ter plaatse van een splitsingspunt moet zowel het stroombeeld ter plaatse van het splitsingspunt als het stroombeeld in de moedergeul in beschouwing worden genomen;
- de stroming ter plaatse van een splitsingspunt kan worden onderscheiden in primaire en secundaire stroming;
- de primaire stroming beschrijft de debietverdeling over de hoofd- en nevengeul aan de hand van de evenwichtsdebieten van de hoofd- en nevengeul;
- de secundaire stroming is de afwijking van de werkelijke stroming van de primaire stroming. Deze wordt beïnvloed door de hoek van afbuiging α , het debiet in de moedergeul Q_m en de afronding van de oeverknik;
- aan het begin van de nevengeul bij de bovenstroomse oever ontstaat er een neer. Hierdoor wordt de effectieve toegangsbreedte van de nevengeul kleiner. De grootte van de neer wordt beïnvloed door de hoek van afbuiging α , het debiet in de moedergeul Q_m en de afronding van de oeverknik;
- onder invloed van de spiraalstroming gaat het debiet bij de bodem in de moedergeul naar de nevengeul. Het debiet bovenin de waterkolom gaat naar de hoofdgeul. Dit betekent dat de sedimentconcentratieverdeling over de diepte belangrijk is. In dit onderzoek wordt aangenomen dat de sedimentverdeling over de diepte zeer scheef is, zodat er voornamelijk bodemtransport plaatsvindt, zie Fig. 2.3. In Hoofdstuk 3 zal blijken dat in de situatie dat er voornamelijk bodemtransport plaatsvindt, de sedimentverdeling over de diepte geen invloed heeft.

3. FORMULERING CONCEPT-SPLITSINGSPUNTRELATIE

In dit hoofdstuk zal een concept worden opgesteld van een splitsingspuntrelatie voor het sedimenttransport naar de nevengeul. Het sedimenttransport is gerelateerd aan de waterbeweging via de snelheid. Om tot een goede splitsingspuntrelatie te komen, is het noodzakelijk om een goede beschrijving van de waterbeweging te hebben. Daarom wordt in § 3.1 een theoretische beschrijving gegeven van de water- en sedimentbeweging. Aan de hand van de literatuurstudie en § 3.1 wordt in § 3.2 het sedimenttransport ten gevolge van de globale en lokale waterbeweging afgeleid. Vervolgens wordt in § 3.3 een concept-splitsingspuntrelatie opgesteld.

3.1. Globale water- en sedimentbeweging

3.1.1. Globale waterbeweging

Als er wordt uitgegaan van hydrostatische drukverdeling over de diepte, kan de 3-D waterbeweging worden vereenvoudigd tot een 2-D waterbeweging die over de diepte is geïntegreerd. De waterbeweging kan dan worden beschreven met Vergelijkingen (3.1), (3.2) en (3.3), zie ook Fig. 3.1. In deze vergelijkingen is de zijdelingse uitwisseling van horizontale impuls verwaarloosd.

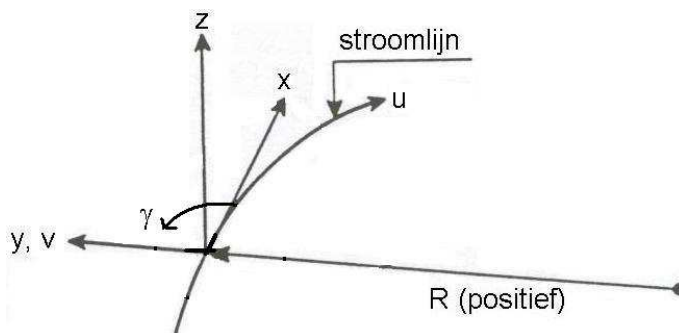
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial h \cdot v}{\partial y} = 0 \quad \text{massabalans/continuïteit} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + g \cdot \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) + \frac{g \cdot u \cdot \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 \cdot R_h} = 0 \quad (3.2)$$

impulsbalans/ beweging in x-richting

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + g \cdot \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) + \frac{g \cdot v \cdot \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 \cdot R_h} = 0 \quad (3.3)$$

impulsbalans/ beweging in y-richting



Figuur 3.1: Definitie assenstelsel voor dieptegemiddelde stroming.

Hierin is: u snelheid in x-richting, dit is de langsrichting [m/s]
 x afstand in langsrichting [m]

3.1.2. Globale sedimentbeweging

De massabalans voor de sedimentbeweging wordt beschreven met Vergelijking (3.4):

$$\frac{1}{1 - \epsilon_p} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} = 0 \quad \text{massabalans/continuïteit} \quad (3.4)$$

Hierin is: ϵ_p poriëngehalte [-]
 x eigenschap van een parameter in x-richting of langsrichting [-]
 y eigenschap van een parameter in x-richting of dwarsrichting [-]

Het sedimenttransport S is een functie van verschillende parameters, zie Vergelijking (3.5):

$$S = f(\tau_b, g, \rho_w, \nu, \rho_s, D) \quad (3.5)$$

Hierin is: τ_b bodemschuifspanning [N/m²]
 ν kinematische viscositeit water [m²/s]

Alle parameters in Vergelijking (3.5) behalve de bodemschuifspanning τ_b worden constant geacht. De bodemschuifspanning is uit te drukken in de snelheid u met Vergelijking (3.6):

$$\tau_b = \rho_w \cdot g \cdot \frac{u \cdot \sqrt{u^2 + \nu^2}}{C^2} \quad (3.6)$$

Met behulp van Vergelijking (2.5) kan Vergelijking (3.6) worden herschreven tot Vergelijking (3.7):

$$\tau_b = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot i \quad (3.7)$$

De hoeveelheid sedimenttransport zal berekend worden met de eenvoudige machtsformule die alleen afhankelijk is van de snelheid u , zie Vergelijking (3.8) (Engelund & Hansen [1967]). De sedimentbeweging maakt een hoek met de waterbeweging. Deze hoek is afhankelijk van de bodemschuifspanning en de zwaartekracht. De richting van de bodemschuifspanning wordt beschreven met Vergelijking (3.9) (Jansen *et al.* [1979]). De invloed van de zwaartekracht wordt bepaald door de bodemhellingen in langs- en dwarsrichting. De richting van het sedimenttransport wordt dan beschreven met Vergelijking (3.10) (Koch & Flokstra [1980]).

$$s = m \cdot u^n \quad \text{sedimenttransport} \quad (3.8)$$

$$\tan \delta = \frac{\nu}{u} - A \cdot \frac{h}{R} \quad \text{richting bodemschuifspanning} \quad (3.9)$$

$$\tan \gamma = \frac{\sin \delta - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial y}}{\cos \delta - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x}} \quad (3.10)$$

Hierin is: m coëfficiënt voor het sedimenttransport [m²⁻ⁿ/s¹⁻ⁿ]
 $= \frac{0,05}{\sqrt{g} \cdot C^3 \cdot \Delta^2 \cdot D_{50}}$ (Engelund & Hansen [1967])
 D_{50} mediane korreldiameter [mm]
 n macht van de snelheid in de sedimenttransportformule [-]
 $= 5$ (Engelund & Hansen [1967])
 δ hoek bodemschuifspanning met waterbeweging [° of rad]
 A coëfficiënt voor de richting van de snelheid bij de bodem [-]
 bij een logaritmisch snelheidsprofiel
 $= 2 \cdot \frac{\varepsilon}{\kappa^2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa \cdot C} \right)$ (Koch & Flokstra [1980])
 ε calibratiecoëfficiënt voor de intensiteit van de spiraalstroming [-]
 $= 1$
 κ Von Karman constante [-]
 $\approx 0,4$
 R effectieve kromtestraal stroomlijn [m]
 $=$ straal van de kromming van de as van de geul

γ	hoek sedimentbeweging met waterbeweging	[° of rad]
$f(\theta)$	weegfunctie die de invloed van de bodemhellingen bepaalt	[-]
	$= \frac{0,85}{E} \cdot \sqrt{\theta}$	
E	calibratiecoëfficiënt voor de invloed van de dwarshelling	[-]
	≈ 1	
θ	Shieldsparemeter	[-]
	$= \frac{u^2 + v^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}}$	

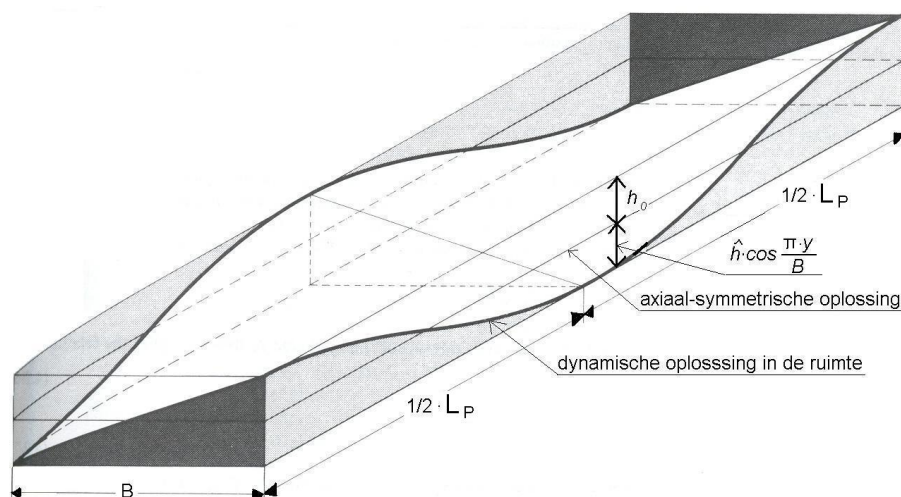
3.1.3. Oplossing globale water- en sedimentbeweging

Onder anderen Struiksma *et al.* [1985] en Struiksma & Crosato [1989] hebben met behulp van lineaire analyse de 2-D water- en sedimentbeweging geanalyseerd. In deze analyse wordt de bodemligging in rivierbochten gedacht opgebouwd te zijn uit twee elementen:

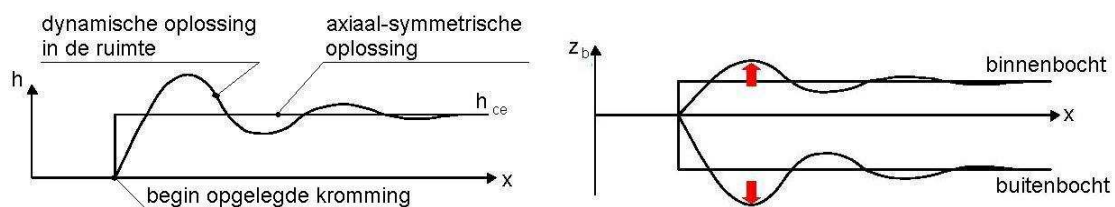
Axiaal-symmetrische oplossing, dit is de evenwichtsbodemligging bij de opgelegde kromming. Door de spiraalstroming die wordt opgewekt in een bocht, ontstaat er in de evenwichtssituatie een point-bar in de binnenbocht en een diepe buitenbocht;

Dynamische oplossing in de ruimte. Deze oplossing is de werkelijke bodemligging en beschrijft de aanpassing van de bodemligging in de ruimte vanaf het begin van de kromming naar de evenwichtsooplossing ten gevolge van het zogenaamde herverdelingseffect.

Dit kan schematisch worden weergegeven met Fig. 3.2.



3.2a: 3-D weergave van de bodemligging (Jansen *et al.* [1979]).



3.2b: Weergave bodemligging in grafiek (De Vriend *et al.* [2001]).

Figuur 3.2: Verloop aanpassing bodemligging aan opgelegde kromming.

Het bodempatroon in het aanpassingsgebied kenmerkt zich door point-bars die afwisselend in de binnen- en buitenbocht liggen. Dit kan als volgt verklaard worden: de bodem wil zich vanaf het begin van de opgelegde kromming in langsricting aanpassen aan de nieuw opgelegde evenwichtssituatie. Hiervoor moet er sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht worden getransporteerd, zodat er een point-

bar wordt gevormd in de binnenbocht en de buitenbocht dieper wordt. Echter, door traagheid van de sedimentbeweging, wordt er te laat gestopt met het transport van sediment van de buiten- naar de binnenbocht. Het herverdelende sedimenttransport van de buitenbocht naar de binnenbocht schiet als het ware door. Om dit te herstellen volgt hierop sedimenttransport van de binnen- naar de buitenbocht. De bodem ligt op dit punt al dichter bij de evenwichtsbodemligging dan aan het begin van de bocht. Hierdoor is de aandrijvende kracht voor aanpassing aan de evenwichtsbodemligging kleiner dan aan het begin van de bocht. Het gevolg is dat het herverdelende sedimenttransport niet meer zo ver doorschiet als aan het begin van de bocht en de werkelijke bodemligging dempt langzaam uit tot de evenwichtsbodemligging.

Twee kenmerkende parameters kunnen het gedrag van de riviermorfologie in een bocht goed beschrijven, zie Vergelijkingen (3.11), (3.12) en (3.13):

$$\lambda_w = \frac{C^2 \cdot h_0}{2 \cdot g} \quad (3.11)$$

relaxatielengte waterbeweging

$$\lambda_s = \frac{h_0}{(m \cdot \pi)^2} \cdot \left(\frac{B}{h_0} \right)^2 \cdot f(\theta) \quad (3.12)$$

relaxatielengte sedimentbeweging

$$IP = \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \quad (3.13)$$

Hierin is:	λ_w	relaxatielengte waterbeweging	[m]
	λ_s	relaxatielengte sedimentbeweging	[m]
	m	vorm van de stationaire bodemgolf in dwarsrichting $\in \{1, 2, \dots\}$, voor de Nederlandse situatie geldt: $m = 1$	[-]
	IP	interactieparameter	[-]

De relaxatielengten λ_w en λ_s zijn karakteristieke parameters voor het verloop van de bodemligging in langsrichting en geven aan hoe snel de rivier zich aanpast aan een nieuwe evenwichtssituatie. In het geval van een erodeerbare bodem verlopen de aanpassing van de water- en de sedimentbeweging aan de nieuwe evenwichtssnelheid u_{ce} en de nieuwe evenwichtswaterdiepte h_{ce} volgens een gedempte sinusfunctie, zie Vergelijkingen (3.14) en (3.15):

$$u = u_{ce} + \hat{U} \cdot e^{-\frac{x}{L_D}} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{L_P} \cdot (x + x_u) \quad (3.14)$$

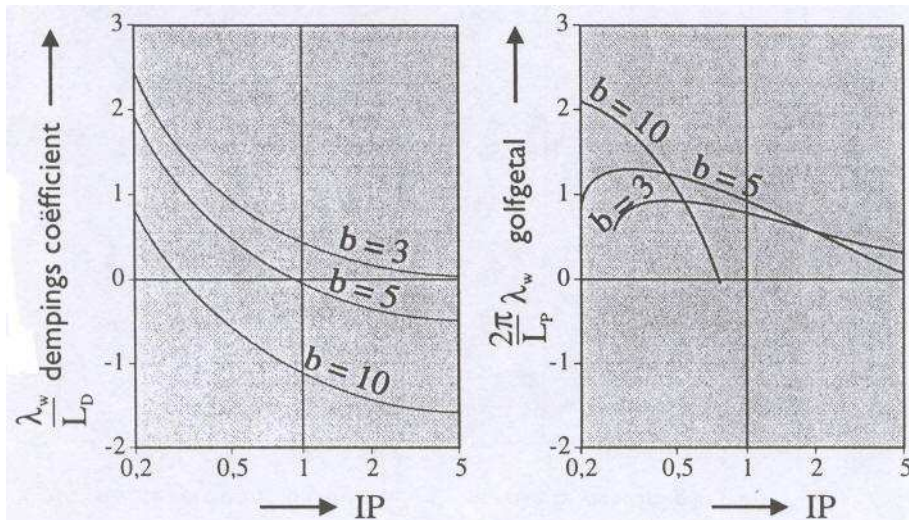
$$h = h_{ce} + \hat{H} \cdot e^{-\frac{x}{L_D}} \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{L_P} \cdot (x + x_h) \quad (3.15)$$

Hierin is:	u_{ce}	evenwichtssnelheid	[m/s]
	\hat{U}	amplitude snelheid in x-richting	[m/s]
	L_D	dempingslengte verstoring	[m]
		$= \frac{4 \cdot \lambda_w}{2 \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - n + 3}$	

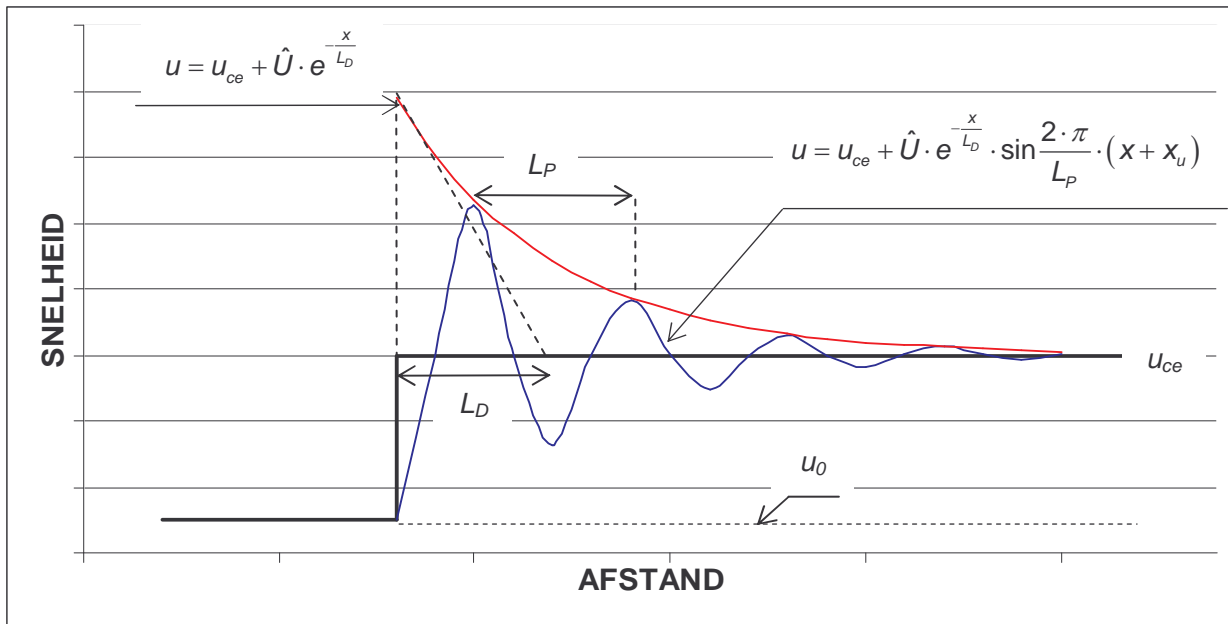
L_P	golflengte verstoring	[m]
	$= \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_w \cdot \sqrt{(n+1) \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_s} - \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_s}\right)^2 - \left(\frac{n-3}{2}\right)^2}}$	
x_U	faseverschuiving waterbeweging	[m]
h_{ce}	evenwichtswaterdiepte	[m]
\hat{H}	amplitude waterdiepte	[m]
x_h	faseverschuiving sedimentbeweging	[m]

Voor het gedrag van de rivier moeten we de grootte van de interactieparameter IP in beschouwing nemen. Hierbij kunnen zich twee situaties voordoen, zie ook Fig. 3.3:

- $IP < 1$: de oplossing volgens de Vergelijkingen (3.14) en (3.15) is stabiel. De water- en sedimentbeweging passen zich volgens een gedempte sinus aan aan de nieuwe evenwichtssituatie, zie Fig. 3.4;
- $IP > 1$: de oplossing volgens de Vergelijkingen (3.14) en (3.15) is instabiel. Het gevolg is opslingering, waarbij de point-bars die afwisselend in de binnen- en buitenbocht worden gevormd, steeds hoger worden.



Figuur 3.3: Verband interactieparameter IP en stabiliteit bodemligging (Struikma & Crosato [1989]). De coëfficiënt b in deze figuur is gelijk aan de coëfficiënt n in dit afstudeeronderzoek, de macht van de snelheid in de sedimenttransportformule.



Figuur 3.4: Verloop aanpassing water- en sedimentbeweging aan verstoring als $IP < 1$. Hier is als voorbeeld het verloop van de waterbeweging weergegeven.

Uit bovenstaande theorie blijkt dat er in langsrichting een herverdeling optreedt van water van de binnen- naar de buitenbocht en van sediment van de buiten- naar de binnenbocht.

De hierboven aangehaalde theorie is van belang voor de sedimentverdeling in de moedergeul ter plaatse van het splitsingspunt. Uit deze theorie volgt namelijk dat het sedimenttransport per eenheid van breedte s afhankelijk is van de plaats in langsrichting vanaf het begin van de bocht en de plaats in dwarsrichting in de geul.

3.2. Sedimenttransport ten gevolge van globale en lokale waterbeweging

3.2.1. Schematisatie sedimenttransport naar hoofdgeul en nevengeul

Uit de literatuurstudie blijkt dat de waterbeweging kan worden gesplitst in primaire en secundaire stroming. Volgens Vergelijking (3.8) is het sedimenttransport afhankelijk van de watersnelheid. Dit betekent dat ook het sedimenttransport kan worden gesplitst in sedimenttransport ten gevolge van de primaire stroming en secundaire effecten, of ten gevolge van de globale en de lokale waterbeweging, zie Vergelijkingen (3.16) en (3.17):

$$S_s = S_{sp} + S_{ss} \quad (3.16)$$

$$S_b = S_{bp} + S_{bs} \quad (3.17)$$

Hierin is:	S_s	sedimenttransport naar de hoofdgeul	$[m^3/s]$
	S_{sp}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de globale waterbeweging	$[m^3/s]$
	S_{ss}	sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van lokale waterbeweging	$[m^3/s]$
	S_b	sedimenttransport naar de nevengeul	$[m^3/s]$
	S_{bp}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de globale waterbeweging	$[m^3/s]$
	S_{bs}	sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging	$[m^3/s]$

In het vervolg van § 3.2 zal de afleiding van het sedimenttransport naar de nevengeul uitgebreid worden behandeld. Het sedimenttransport naar de hoofdgeul kan op vrijwel dezelfde wijze worden afgeleid. Van deze afleiding zullen voornamelijk de resultaten worden getoond.

3.2.2. Globale waterbeweging

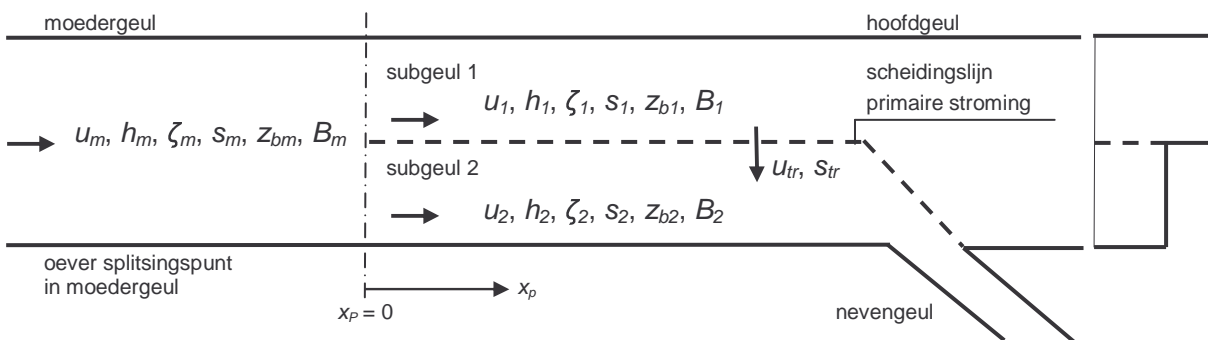
De globale waterbeweging, of primaire stroming, geeft de invloed weer van de kromming van de moedergeul op de sedimentverdeling bij het splitsingspunt. Volgens Fig. 2.13 geldt voor de primaire stroming in het geval van een rechte moedergeul dat het debiet uniform over de breedte is verdeeld, zodat geldt $u_1 \cdot h_1 = u_2 \cdot h_2$. In dat geval gaat er een stroombaan met een breedte van $B_m \cdot \frac{Q_{be}}{Q_{be} + Q_{se}}$ de

nevenggeul ingaat. Deze breedte is gemeten vanaf de oever van het splitsingspunt in de moedergeul. In het geval van een gekromde moedergeul is de primaire stroming qua volume niet meer gelijkmatig over de breedte verdeeld. De plaats van de scheidingslijn van de primaire stroming is dan afhankelijk van de vorm van de dwarsdoorsnede. Het water en het sediment in de stroombaan tussen deze scheidingslijn en de oever van het splitsingspunt van de moedergeul, zal naar de nevenggeul worden vervoerd. De hoeveelheid sediment in deze stroombaan kan bepaald worden door de sedimentverdeling over de breedte te bepalen ten gevolge van een globale verstoring, bijvoorbeeld een bocht. De hoeveelheid sediment in de stroombaan die naar de nevenggeul gaat kan dan worden uitgedrukt met Vergelijking (3.18):

$$S_{bp} = f(\text{vorm dwarsdoorsnede, debietverdeling over de breedte, sedimentverdeling over de breedte}) = f\left(\frac{L}{L_p}, \frac{Q_{se}}{Q_{be}}\right) \quad (3.18)$$

Hierin is: L afstand vanaf het begin van een verstoring in de moedergeul [m]

Op deze manier gedefinieerd, is S_{bp} een gevolg van de globale waterbeweging. De globale waterbeweging wordt gedomineerd door de zwaartekracht en wrijving en kan worden beschreven met het model van Struiksma & Crosato [1989] uit § 3.1.3. Een eenvoudiger soortgelijk model is het twee-geulenmodel van Struiksma [1983] en De Vriend *et al.* [2001]. In dit model wordt een geul opgedeeld in twee subgeulen. Voor elke subgeul kunnen de 1-D continuïteits- en impulsvergelijkingen worden opgesteld. In het model van Struiksma en De Vriend *et al.* zijn de breedtes van Subgeul 1 B_1 en Subgeul 2 B_2 gelijk aan $\frac{1}{2} \cdot B_m$. In de afleiding van dit afstudeeronderzoek kunnen de breedtes van de subgeulen variëren. De subgeulen kunnen water en sediment uitwisselen, zie Fig. 3.5:



Figuur 3.5: Definitie twee-geulenmodel met de karakteristieke parameters per geul (naar Struiksma [1983] en De Vriend *et al.* [2001]).

Hierin is:

1	eigenschap van Subgeul 1	[-]
2	eigenschap van Subgeul 2	[-]
ζ	hoogte waterspiegel ten opzichte van referentieniveau	[m]
u_{tr}	uitwisseling van snelheid tussen de twee subgeulen	[m/s]
s_{tr}	uitwisseling van sediment tussen de twee subgeulen	[m ² /s]

x_p afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van de globale verstoring [m]

Combineren van de 1-D continuïteits- en impulsvergelijkingen van de subgeulen leidt tot een model voor de water- en sedimentbeweging van het gehele systeem. De afleiding hiervan staat in Bijlage B. De uiteindelijke oplossing wordt gegeven door Vergelijkingen (3.19) tot en met (3.21).

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot u_m^n \left(1 - \frac{n}{u_m} \cdot \theta \cdot U \right) \quad (3.19)$$

$$U = U_{ce} + \hat{U} \cdot e^{-\frac{x_p}{L_D}} \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x_p}{L_p} \quad (3.20)$$

Met dezelfde redenering kan voor het sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de primaire stroming worden afgeleid:

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot u_m^n \cdot \left(1 + \frac{n}{u_m} \cdot (1 - \theta) \cdot U \right) \quad (3.21)$$

Definitie van de parameters:

$$\frac{2 \cdot \pi}{L_p} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{-\frac{(3-n)^2}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{n+1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} - \frac{1}{\lambda_s^*}} \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{L_D} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{3-n}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s^*} \right] \quad (3.23)$$

$$\lambda_w = \frac{C^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{h} \quad (3.24)$$

$$\lambda_s^* = \lambda_s \cdot 4 \cdot \theta \cdot (1 - \theta) \quad (3.25)$$

$$\lambda_s = \frac{\bar{h}}{(m \cdot \pi)^2} \cdot \left(\frac{B_m}{\bar{h}} \right)^2 \cdot f(\theta) \quad (3.26)$$

Hierin is:

θ	verhouding tussen breedte Subgeul 1 en breedte moedergeul $= \frac{B_1}{B_m} = \frac{B_m - B_2}{B_m}$	[-]
U	verschil in snelheid tussen Subgeul 1 en Subgeul 2 $= u_1 - u_2$	[m/s]
u_1	snelheid in x-richting in Subgeul 1 $= \bar{u} + (1 - \theta) \cdot U$	[m/s]
\bar{u}	gemiddelde snelheid in de <i>gehele</i> geul $= \theta \cdot u_1 + (1 - \theta) \cdot u_2$	[m/s]
u_2	snelheid in x-richting in Subgeul 2 $= \bar{u} - \theta \cdot U$	[m/s]
U_{ce}	verschil in snelheid tussen Subgeul 1 en Subgeul 2 in	[m/s]

	evenwichtssituatie	
U_0	waarde U bij begin verstoring	[m/s]
λ_s	relaxatielengte sedimentbeweging in twee-geulen-model	[m]
\bar{h}	gemiddelde waterdiepte in de <i>gehele</i> geul	[m]

De breedte van de stroombaan van de primaire stroming die naar de nevengeul gaat B_2 is nog niet gedefinieerd. Doordat de moedergeul gekromd is, is het debiet niet meer gelijkmatig over de breedte verdeeld en kan niet meer worden gesteld dat $B_2 = B_m \cdot \frac{Q_{be}}{Q_{be} + Q_{se}}$. De breedte B_2 kan worden bepaald met de debietverdeling over de breedte, zie Vergelijking (3.27) en (3.28). Voor een meer gedetailleerde afleiding, zie Bijlage B:

$$Q_2 = Q_{be} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot q_i \quad (3.27)$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.28)$$

Met Vergelijkingen (3.27) en (3.28) kan wellicht een meer eenvoudige oplossing worden opgesteld, zie Vergelijkingen (3.29) en (3.30).

$$Q_2 = B_2 \cdot C_2 \cdot h_2^{\frac{3}{2}} \cdot i_2^{\frac{3}{2}} \quad (3.29)$$

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot C_2^5 \cdot h_2^{\frac{5}{2}} \cdot i_2^{\frac{5}{2}} \quad (3.30)$$

Op dezelfde manier kan voor de breedte van de primaire stroming die naar de hoofdgeul gaat worden afgeleid:

$$Q_1 = Q_{se} = \sum_{j=1}^m B_j \cdot q_j \quad (3.31)$$

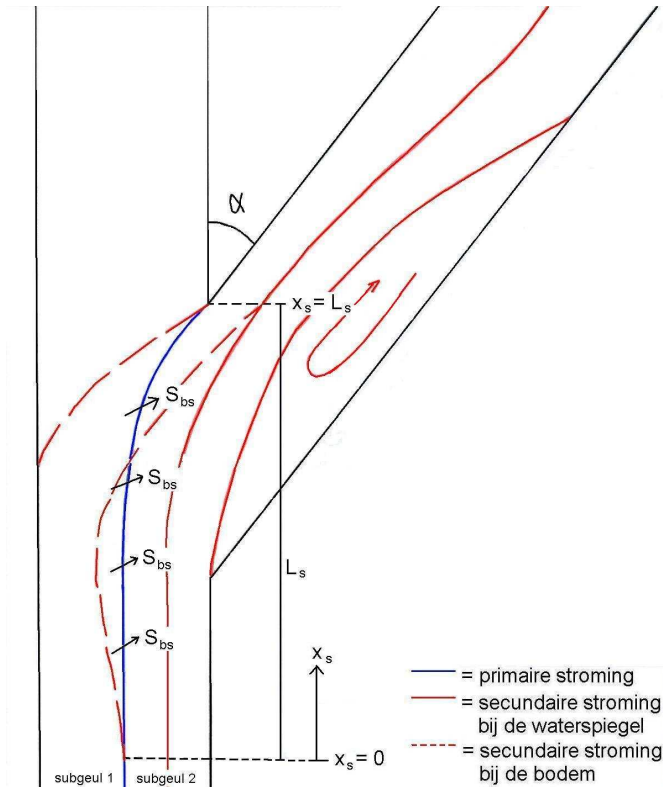
$$B_1 = \sum_{j=1}^m B_j \quad (3.32)$$

$$Q_1 = B_1 \cdot C_1 \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \cdot i_1^{\frac{3}{2}} \quad (3.33)$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot C_1^5 \cdot h_1^{\frac{5}{2}} \cdot i_1^{\frac{5}{2}} \quad (3.34)$$

3.2.3. Lokale waterbeweging

De lokale waterbeweging geeft de invloed weer van de afbuiging van het debiet naar de nevengeul en van de kromming van de hoofdgeul indien de moedergeul recht is. De secundaire stroming veroorzaakt een circulatiestroming ter plaatse van het splitsingspunt en beschrijft een bochtstroming. Het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de secundaire stroming en de dwarshelling bestaat dan uit het sediment in Subgeul 1 dat door de circulatiestroming en de dwarshelling naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd, zie Fig. 3.6:



Figuur 3.6: Sediment uit Subgeul 1 dat naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd onder invloed van de lokale waterbeweging.

Hierin is: s_{bs} sedimenttransport per eenheid van lengte ten gevolge van de lokale waterbeweging [m^2/s]
 L_s verstoringlengte waterbeweging in bovenstroomse richting ten gevolge van het splitsingspunt [m]
 x_s afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van de lokale verstoring [m]

Het sedimenttransport per eenheid van lengte ten gevolge van de secundaire stroming en de dwarshelling s_{bs} is een functie van het sedimenttransport in Subgeul 1, de lengte in bovenstroomse richting vanaf de splitsingskop waarover de sedimentbeweging wordt verstoord door het splitsingspunt, de richting van het sedimenttransport ter plaatse van het splitsingspunt en de sedimentverdeling over de diepte, zie Vergelijking (3.35).

$$s_{bs} = f(s_1(x), \text{verstoringlengte sedimentbeweging, richting sedimenttransport, afmetingen neer, sedimentverdeling over de diepte}) \quad (3.35)$$

Een uitgebreide uitwerking van Vergelijking (3.35) staat in Bijlage C. Hierna volgt een samenvatting van deze uitwerking.

Verstoringlengte sedimentbeweging:

Voor de verstoringlengte in bovenstroomse richting L_s moet de afstand worden genomen waarover de waterbeweging wordt verstoord. De sedimentbeweging is immers een gevolg van de waterbeweging. De lokale verstoring van de waterbeweging door het splitsingspunt vindt over zo'n kleine afstand plaats, dat wrijving verwaarloosd kan worden. Dit betekent dat de stroming rotatievrij is en dat de advectieve termen

$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ in Vergelijking (3.2) belangrijk zijn. In dat geval wordt de verstoring lengte L_s gedefinieerd volgens Vergelijking (3.36) (El-Sayed [1995]).

$$L_s = a \cdot \frac{B_m}{m \cdot \pi} \quad (3.36)$$

Hierin is: a calibratiefactor voor de verstoring lengte $= 5$ [-]

De coëfficiënt m heeft de waarde 1.

Richting sedimenttransport::

In een bocht maakt de sedimentbeweging een hoek met de waterbeweging. Deze kan worden beschreven met Vergelijking (3.40):

$$\gamma = A \cdot \frac{h}{R} + \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.37)$$

$$* A = b \cdot \ln(C) \quad (3.38)$$

$$* R = \frac{L_s}{\sin \alpha}$$

$$* \frac{\Delta z_b}{\Delta y} = \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{B_1 + B_2} \quad (3.39)$$

$$\gamma = -b \cdot \ln(C) \cdot \frac{h \cdot \sin \alpha}{L_s} - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{B_1 + B_2} \quad (3.40)$$

Hierin is: b calibratiefactor voor de coëfficiënt voor de richting van de snelheid bij de bodem bij een logaritmisch snelheidsprofiel $= 2,75$ [-]

Afmetingen neer:

Over neervorming bij splitsingspunten is geen kwantitatieve beschrijving in de literatuur beschikbaar. Uit de literatuurstudie is gebleken dat de grootte van de neer afhankelijk is van:

- de grootte van het debiet in de moedergeul Q_m ;
- de hoek van afsplitsing α .

Dit betekent dat de afmetingen van de neer een maat zijn voor de hoeveelheid impuls die niet gegenereerd kan worden om debiet af te buigen naar de nevengeul. In de vergelijking die in § 3.3 wordt opgesteld, zal de coëfficiënt c worden toegevoegd die de invloed hiervan weergeeft. In Hoofdstuk 4 zullen de bestaande waarnemingen worden geanalyseerd en kan de vorm van de coëfficiënt c worden bepaald.

Sedimentverdeling over de diepte:

De hoeveelheid transport van gesuspendeerd sediment ten gevolge van secundaire stroming over de scheidinglijn van de primaire stroming kan gedefinieerd worden door Vergelijking (3.41):

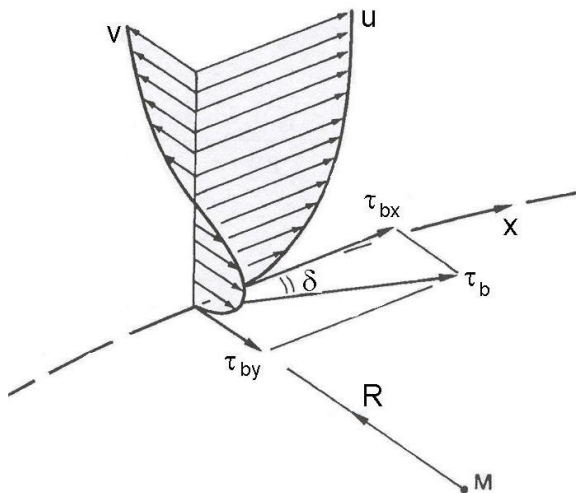
$$S_{tr} = \int_0^h c_s(z) \cdot v(z) dz \quad (3.41)$$

Hierin is: S_{tr} transversale suspensietransport $[m^3/s]$

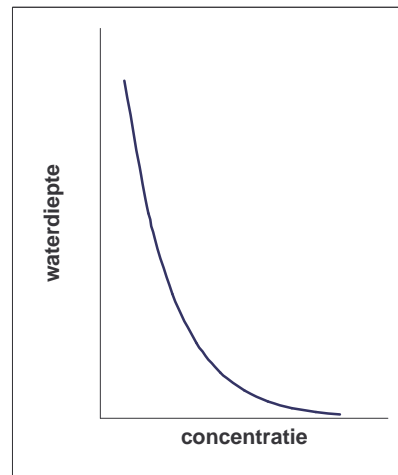
c_s concentratie sediment in suspensie

$[m^3/m^3]$

Een karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming is weergegeven in Fig. 3.7. Hieruit blijkt dat het water uit de bovenste helft van de waterkolom van Subgeul 2 naar de hoofdgeul wordt getransporteerd. In Fig. 3.8 is een karakteristieke concentratieverdeling van het sediment over de diepte weergegeven in het geval van bodemtransport. Hieruit blijkt dat de sedimentconcentratie bovenin de waterkolom zeer gering is. Op basis hiervan wordt het de invloed van de uitwisseling van sediment ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming onder invloed van de stroming in dwarsrichting verwaarloosd.



Figuur 3.7: Karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de globale waterbeweging.



Figuur 3.8: Concentratieverdeling sediment over de diepte.

Sedimenttransport per eenheid van breedte:

Het sedimenttransport per eenheid van breedte in Subgeul 1 neemt af in benedenstroomse richting, doordat sediment zijwaarts richting nevengeul wordt getransporteerd. Aangenomen wordt dat de aanpassing van het sedimenttransport per eenheid van breedte en de richting van het sedimenttransport zich exponentieel ontwikkelen vanaf het begin van de kromming. Het verloop van het sedimenttransport in langsrichting kan dan worden beschreven met Vergelijking (3.42):

$$s_1(x) = \left[s_1 - (s_1 - s_s) \cdot e^{\left(\frac{x-a}{\lambda_r}\right)} \right] \cdot \left[1 - \sin(\gamma_b) \cdot e^{\left(\frac{x-a}{\lambda_r}\right)} \right] \quad (3.42)$$

Hierin is: γ_b hoek sedimentbeweging met waterbeweging door kromming [° of rad] nevengeul

Totale oplossing sedimenttransport naar nevengeul ten gevolge van secundaire stroming:

$$s_{bs} = s_1(x) \cdot \sin(\gamma_b) \cdot e^{\left(\frac{x-a}{\lambda_r}\right)} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} S_{bs} &= \int_0^{L_s} s_{bs} dx \\ &= \int_0^{L_s} \left(s_1(x) \cdot \sin(\gamma_b) \cdot e^{\left(\frac{x-a}{\lambda_r}\right)} \right) dx \\ &= \left[\frac{1}{a} \cdot s_1 - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (s_1 - s_s) + \left(-\frac{1}{2 \cdot a} \cdot s_1 + \frac{1}{3 \cdot a} \cdot (s_1 - s_s) \right) \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$* s_1 = m \cdot (u_m + (1 - \theta) \cdot U)^5$$

Deze vergelijking kan worden vereenvoudigd door in de beschrijving van $s_1(x)$ de termen die de parameter s_s bevatten, te elimineren. Vergelijking (3.43) gaat dan over in Vergelijking (3.45):

$$S_{bs} = \frac{d}{a} \cdot s_1 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \quad (3.45)$$

Hierin is: d calibratiefactor voor de invloed van het sedimenttransport [-]
per eenheid van breedte
= 0,9

Het sedimenttransport per eenheid van breedte in de hoofdgeul s_s moet eigenlijk worden bepaald via een trial-and-error-berekening. In dit onderzoek wordt s_s gedefinieerd alsof er behoud van het totale sedimenttransport is in Subgeul 1, zie Vergelijking (3.46):

$$s_s = s_1 \cdot \frac{B_1}{B_s} \quad (3.46)$$

Uit de handberekeningen moet blijken of S_{bs} zo klein is dat Vergelijking (3.46) kan worden toegepast.

Indien de hoofdgeul gekromd is (en de moedergeul recht) of de geul een dwarshelling heeft ter plaatse van het verstoringsgebied, vindt er ook sedimenttransport plaats uit Subgeul 2 naar Subgeul 1 en de hoofdgeul. De grootte van dit sedimenttransport kan op dezelfde wijze worden afgeleid als het sedimenttransport van Subgeul 1 naar Subgeul 2 en de nevengeul. Verschil is dat er geen beperkende invloed is van een neer in de hoofdgeul. Hieruit volgen Vergelijkingen (3.47) tot en met (3.50):

$$s_{ss} = f(s_2(x), \quad (3.47)$$

*verstoringslengte sedimentbeweging,
richting sedimenttransport,
sedimentverdeling over de diepte)*

$$s_{ss} = s_2(x) \cdot \sin(\gamma_s) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_R} - a\right)} \quad (3.48)$$

$$S_{ss} = \left[\frac{1}{a} \cdot s_2 - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (s_2 - s_b) + \left(-\frac{1}{2 \cdot a} \cdot s_2 + \frac{1}{3 \cdot a} \cdot (s_2 - s_b) \right) \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \quad (3.49)$$

$$= \frac{d}{a} \cdot s_2 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \quad (3.50)$$

$$* s_2 = m \cdot (u_m - \theta \cdot U)^5$$

Hierin is: γ_s hoek sedimentbeweging met waterbeweging door kromming [° of rad]
hoofdgeul

De correctie voor de kromming van de hoofdgeul dient alleen te worden toegepast indien de moedergeul recht is en de hoofdgeul gekromd.

3.3. Concept-splitsingspuntrelatie

De concept-splitsingspuntrelatie is beschreven in Vergelijkingen (3.51) en (3.52):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{S_{sp} - S_{bs} + S_{ss}}{S_{bp} + S_{bs} - S_{ss}} \cdot c \quad \text{concept-splitsingspuntrelatie (3.51)}$$

$$* S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot u_1^n$$

$$* S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot u_2^n$$

$$\begin{aligned} * S_{bs} &= \frac{d}{a} \cdot s_1 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \\ &= \frac{d}{a} \cdot \frac{S_{sp}}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \\ &= S_{sp} \cdot \frac{\frac{d}{a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s}{B_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * S_{ss} &= \frac{d}{a} \cdot \frac{S_{bp}}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \\ &= S_{bp} \cdot \frac{\frac{d}{a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s}{B_2} \end{aligned}$$

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{B_1 \cdot m \cdot u_1^n \cdot \left(1 - \frac{d}{B_1 \cdot a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \right) + B_2 \cdot m \cdot u_2^n \cdot \left(\frac{d}{B_2 \cdot a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \right)}{B_1 \cdot m \cdot u_1^n \cdot \left(\frac{d}{B_1 \cdot a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \right) + B_2 \cdot m \cdot u_2^n \cdot \left(1 - \frac{d}{B_2 \cdot a} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \right)} \cdot c \quad (3.52)$$

Hierin is: c coëfficiënt die een maat is voor de niet gegenereerde [-]
hoeveelheid impuls om debiet af te buigen naar de
nevengemaal

In Vergelijking (3.52) is de volgende vorm te herkennen:

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{B_1 \cdot m \cdot u_1^n \cdot (1 - \xi) + B_2 \cdot m \cdot u_2^n \cdot \sigma}{B_1 \cdot m \cdot u_1^n \cdot \xi + B_2 \cdot m \cdot u_2^n \cdot (1 - \sigma)} \cdot c \quad (3.53)$$

Hierin is: ξ correctiefactor voor de invloed van de lokale waterbeweging [-]
op het sedimenttransport naar de nevengemaal
 σ correctiefactor voor de invloed van de lokale waterbeweging [-]
op het sedimenttransport naar de hoofdgeul

Herschrijven van u , invullen van de waarden $a = 5$, $d = 0,9$ en $n = 5$ en wegdelen van de coëfficiënt m geeft Vergelijking (3.54):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \right)}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s) \right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s \right)} \cdot c \quad (3.54)$$

Nogmaals wordt benadrukt dat de term met $\sin(\gamma_s)$ alleen dient te worden toegepast indien de moedergeul recht is en de hoofdgeul gekromd.

4. ANALYSE WAARNEMINGEN

In het verleden zijn er al experimenten en metingen gedaan om het sedimenttransport naar een nevengeul te bepalen. Deze kunnen worden verdeeld in waarnemingen in laboratoriumexperimenten, in schaalmodellen en in prototypes. Dit hoofdstuk bevat een analyse van de experimenten wat betreft de eigenschappen van de geulen en een classificatie van de parameters waarin is gevarieerd. De laboratoriumexperimenten zullen in § 4.1.1 worden geanalyseerd, de waarnemingen in schaalmodellen in § 4.1.2. Van de waarnemingen in prototypes zijn geen gegevens beschikbaar. Vervolgens zal in § 4.2 de vorm van de coëfficiënt c worden bepaald.

4.1. Inventarisatie en classificatie waarnemingen

4.1.1. Laboratoriumexperimenten

Bij laboratoriumexperimenten kunnen onder gecontroleerde omstandigheden experimenten worden uitgevoerd, zodat parameters nauwkeurig kunnen worden geregeld. Hierdoor kan de invloed van bepaalde parameters goed worden bepaald.

In dit rapport zullen de volgende laboratoriumexperimenten worden geanalyseerd: Bulle [1926], Riad [1961], Shafai-Bagestan [1999] en Den Dekker & Voorthuizen [1994] en Roosjen & Zwanenburg [1995].

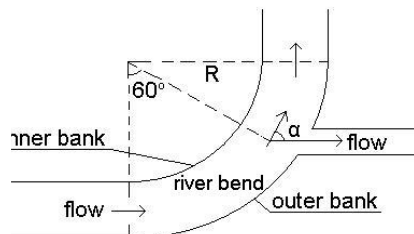
Bulle [1926]:

Bulle heeft zijn experimenten uitgevoerd in een proefopstelling met een vaste bodem. Omdat er op een vaste bodem geen erosie kan plaatsvinden, kan dit kwantitatief gezien tot verkeerde resultaten leiden. Een schets van de proefopstelling is gegeven in Fig. 2.4.

Riad [1961]:

Bij elk stromingsregime hoort een ander evenwichtstransport. In de experimenten van Riad is er gewacht met het doen van metingen totdat het sedimenttransport in evenwicht was. In zijn experimenten heeft de proefopstelling dus een zandbodem. Een schets van de proefopstelling is gegeven in Fig. 2.4.

Shafai-Bagestan [1999]:

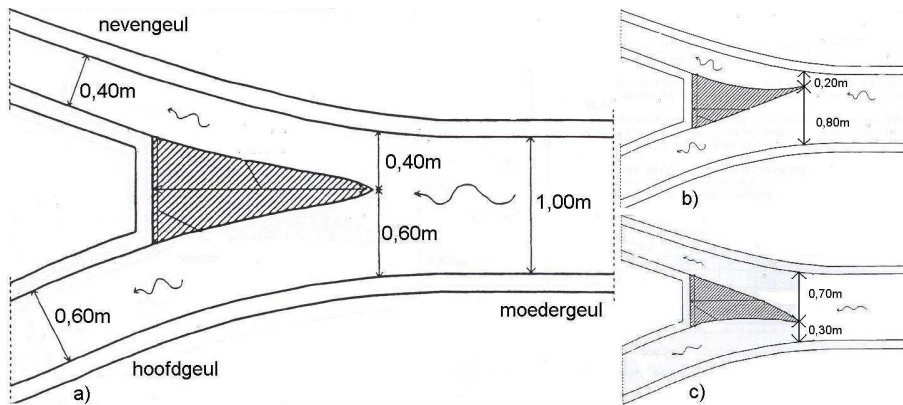


Figuur 4.1: Plattegrond proefopstelling Shafai-Bagestan (Shafai-Bagestan [1999]).

Uit bestaande onderzoeken was al naar voren gekomen dat om het sedimenttransport naar de nevengeul te minimaliseren, de nevengeul aan de buitenkant van een gekromde moedergeul moet afsplitsen (zie ook Akkerman [1993]). Shafai-Bagestan heeft onderzoek gedaan naar welke hoek van afbuiging α in dat geval het sedimenttransport naar de nevengeul minimaliseert. Een schets van de proefopstelling die hij gebruikte is weergegeven in Fig. 4.1. De gegevens van Shafai-Bagestan zijn vrij moeilijk te reproduceren door een onvolledige verslaglegging.

Den Dekker & Voorthuizen [1994] en Roosjen & Zwanenburg [1995]:

Den Dekker & Voorthuizen en Roosjen & Zwanenburg hebben aan de Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET) enkele proeven uitgevoerd in een schaalmodel. De proeven waren een uitbreiding van de stabiliteitsanalyse in 1-D morfodynamische netwerkmodellen van Wang *et al.* [1995]. Het onderzoek richtte zich op de invloed van verschillende vormen van het splitsingspunt, zie Fig. 4.2.



Figuur 4.2: Plattegrond proefopstelling BUET. In Fig. 4.2b en 4.2c zijn de afwijkende vormen van de splitsingspunten weergegeven (Roosjen & Zwanenburg [1995]).

De hoek van afsplitsing α is voor alle situaties gelijk, namelijk 26° . Het verschil tussen de situaties is de entreebreedte van de hoofd- en nevengeul.

Bij vergelijking van de proefopstellingen, waarbij de proefopstelling van Bulle als referentie wordt gebruikt, wijkt de proefopstelling van Shafai-Bagestan af van de andere drie. In zijn proefopstelling is de moedergeul gekromd. De globale spiraalstroming werkt de lokale spiraalstroming tegen, zodat verwacht kan worden dat in zijn resultaten relatief veel sediment naar de hoofdgeul gaat. Bij vergelijking van de proefopstelling van Den Dekker & Voorthuizen en Roosjen & Zwanenburg met die van Bulle en Riad ligt het verschil in de kromming van de hoofdgeul direct na het splitsingspunt. Dit betekent dat zowel het debiet naar de hoofdgeul als het debiet naar de nevengeul moet worden afgebogen en beiden een spiraalstroming beschrijven. Deze spiraalstromingen werken elkaar tegen.

Zoals afgeleid in Bijlage C, moet voor de verstoringlengte in bovenstroomse richting worden uitgegaan van wrijvingsloze stroming. Een maat voor de verstoringlengte in bovenstroomse richting is de relaxatielengte van rotatievrije stroming. In dit onderzoek is de relaxatielengte gedefinieerd volgens Vergelijking (4.1). Voor uitleg hierover, zie Bijlage C.

$$\lambda_R = \frac{B_m}{m \cdot \pi} \quad (4.1)$$

In Tabel 4.1 zijn gegevens van de laboratoriumexperimenten weergegeven.

Tabel 4.1: Gegevens laboratoriumexperimenten.

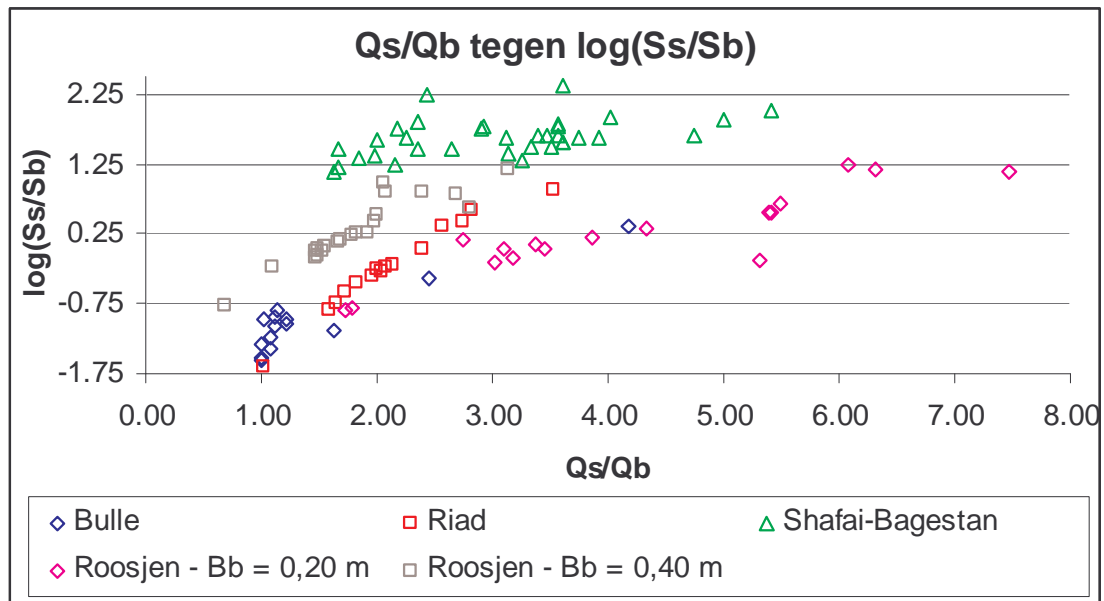
auteur parameterrange	Bulle	Riad	Shafai-Bagestan	Roosjen ¹
Q_m	4,65 - 5 l/s	60,5 - 111,3 l/s	27,7 - 59,3 l/s	10,15 - 38,75 l/s
Q_s	0,90 - 2,5 l/s	30,4 - 70,6 l/s	21,7 - 45,5 l/s	7,38 - 32,71 l/s
Q_b	2,5 - 3,75 l/s	16,0 - 41,9 l/s	6,0 - 14,3 l/s	2,45 - 14,44 l/s
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1 - 4,17	1,01 - 3,53	1,63 - 5,42	0,68 - 7,47
S_m	100%	7,42 - 13,55 kg/u	2,07 - 18,4 g	0,04 - 0,23 m ³
S_s	2,7 - 70,0%	0,18 - 10,9 kg/u	2,0 - 18,0 g	0,01 - 0,18 m ³
S_b	29,8 - 97,3%	1,4 - 10,0 kg/u	0,03 - 0,52 g	0 - 0,24 m ³
$\frac{S_s}{S_b}$	0,03 - 0,52	0,02 - 7,8	14,2 - 233,3	0,14 - 17,14
B_m	0,2 m	0,8 m	0,5 m	1,00 m
B_s	0,2 m	0,8 m	0,5 m	0,3 - 0,8 m
B_b	0,1 - 0,2 m	0,5 m	0,1 m	0,2 - 0,7 m
$\frac{B_s}{B_b}$	1,0 - 2,0	1,6	5,0	0,43 - 4
C	36 m ^{1/2} /s *	46,5 m ^{1/2} /s *		30 m ^{1/2} /s
i	0,003	0,0002 *		0,0013
h_m	58,8 - 80,0 mm *	22,5 - 37,0 cm		10 cm
u	0,29 - 0,43 m/s *	0,27 - 0,43 m/s *		0,10 - 0,39 m/s *
Fr	0,3 - 0,6 *	0,15 - 0,28	0,21 - 0,48	0,10 - 0,39 *
sub- of superkritisch	subkritische stroming	subkritische stroming	subkritische stroming	subkritische stroming
Re	13 - 16*10 ³ *	72,1-108,1*10 ³		8,5 - 32,3*10 ³ *
(niet-) turbulent	turbulente stroming	turbulente stroming		turbulente stroming
$u-w$	0,25 - 0,37	0,41 - 0,66	0,50 - 1,10	0,27 - 1,05
soort transport	bodemtransport	bodemtransport	bodem- en suspensietransport	bodemtransport
D	$D_{max} = 1,2$ mm	$D_{50} = 0,3$ mm	$D_{75} = 0,22$ mm	$D_{50} = 0,27$ mm
spreiding D		1,71		1,42
α	30 - 150°	45°	15° - 90°	26°
vorm moedergeul	recht	recht	90° bocht, afsplitsing nevengeul aan buitenkant kromming	recht, hoofdgeul gekromd
soort bodem	vaste bodem	zandbodem	zandbodem	zandbodem
vorm oeverkolk	niet en wel afgerond	afgerond		afgerond

* = schatting

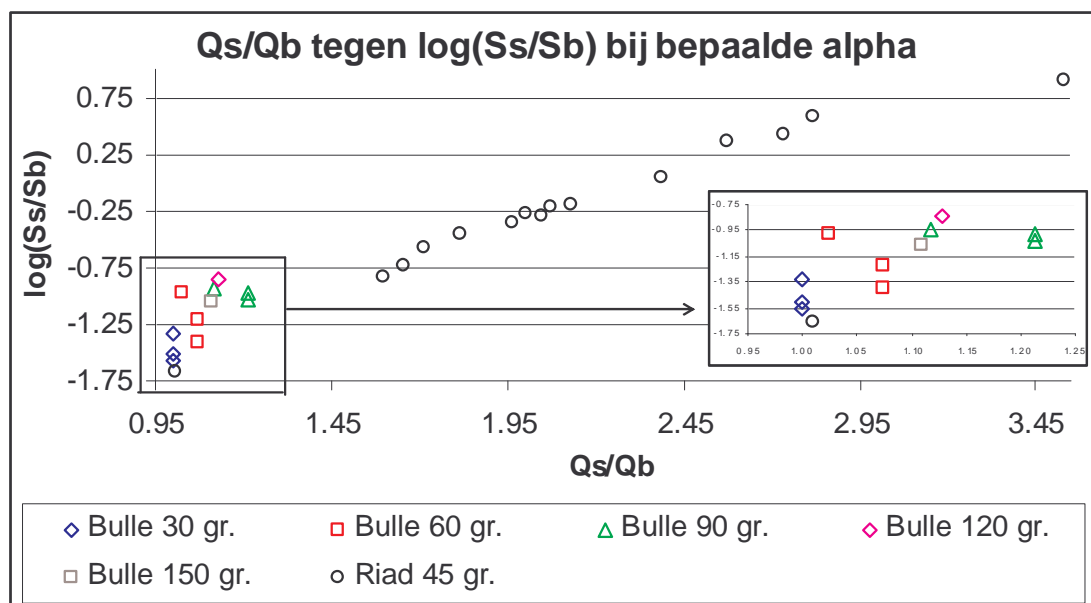
lege cel = niets bekend over die parameter.

¹ Van de situatie in Fig. 4.2c ($B_s = 0,30$ m, $B_b = 0,70$ m) zijn geen goede gegevens beschikbaar.

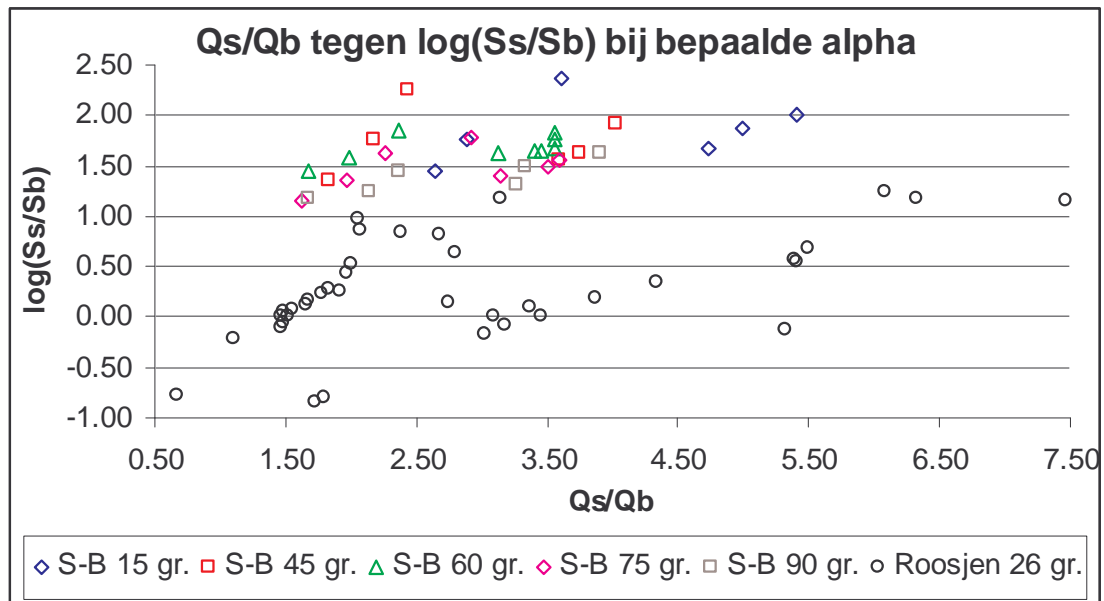
In Fig. 4.3 tot en met 4.6 zijn enkele gegevens geplot in grafieken.



Figuur 4.3: Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ in laboratoriumexperimenten.



Figuur 4.4: Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ voor bepaalde waarden van de hoek van afsplitsing α in laboratoriumexperimenten met een rechte moeder- en hoofdgeul (Bulle en Riad).

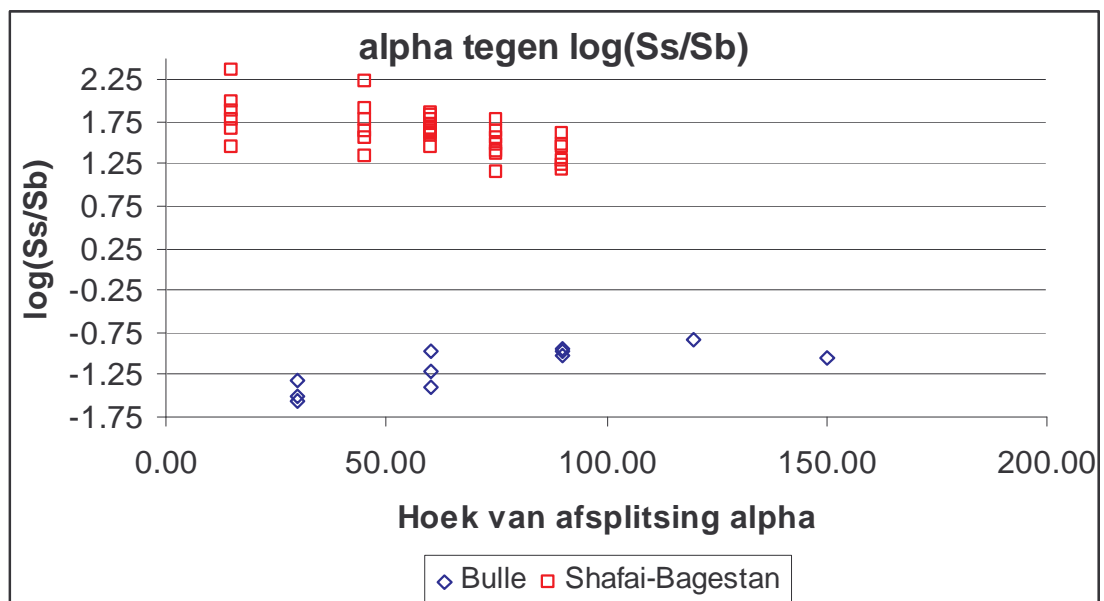


S-B = Shafai-Bagestan

R&Z = Roosjen & Zwanenburg

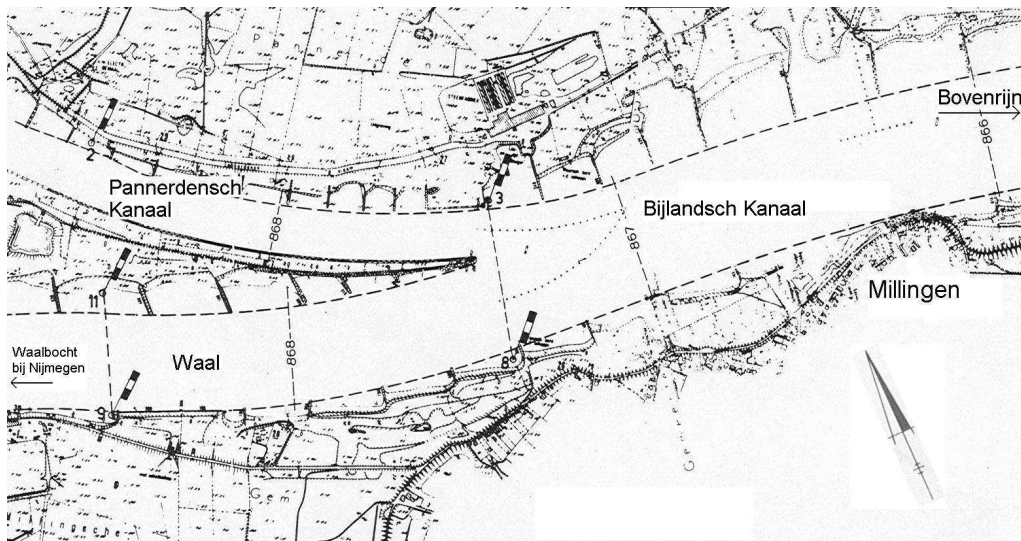
Figuur 4.5: Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ voor bepaalde waarden van de hoek van afsplitsing α in

laboratoriumexperimenten met een gekromde moedergeul (Shafai-Bagestan) of een gekromde hoofdgeul (Roosjen & Zwanenburg).



Figuur 4.6: Hoek van afsplitsing α tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$.

4.1.2. Schaalmodellen

Splitsingspunt Pannerdensche Kop (Van der Zwaard [1981]):

Figuur 4.7: Plattegrond Pannerdensche Kop (Van der Zwaard [1981]).

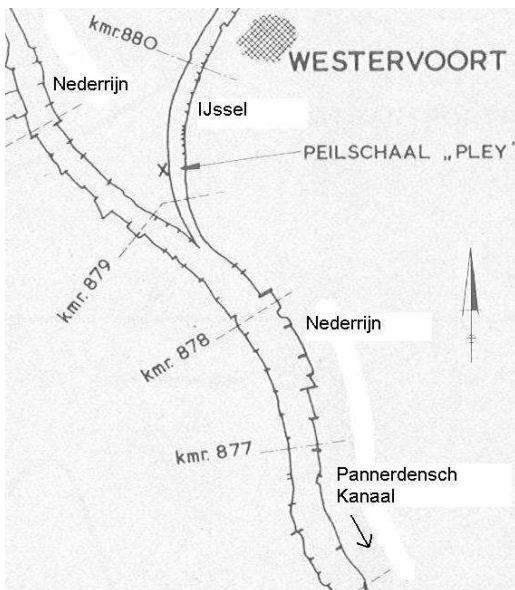
Eind jaren '60 en begin jaren '70 is in opdracht van Rijkswaterstaat onderzoek gedaan naar verbetering van de Waalbocht bij Nijmegen. Onderdeel hiervan was een onderzoek naar het verband tussen de water- en sedimentverdeling bij de Pannerdensche Kop. Daarvoor is een schaalmodel gebouwd in locatie De Voorst van WL|Delft Hydraulics. In Fig. 4.7 is te zien dat het Pannerdensch Kanaal op een bochtvergang afsplitst van het Bijlandsch Kanaal.

Eén van de conclusies is dat er een verband bestaat tussen de debietverdeling $\frac{Q_W}{Q_{PK}}$ en de

sedimentverdeling $\frac{S_W}{S_{PK}}$ (W = Waal, PK = Pannerdensche Kop). Dit verband is onafhankelijk van het

debiet in de Bovenrijn Q_{BR} . Nadeel van het onderzoek is dat een vrij kleine range van debieten is onderzocht.

Splitsingspunt IJsselkop (De Vries & Van de Werff [1969]):



Ten gevolge van de Rijnkanalisatie in de jaren '60 is de afvoerverdeling bij de IJsselkop kunstmatig gewijzigd. Hierdoor kan de Nederrijn zich gedragen als gestuwde en als ongestuwde rivier. Doelen van dit onderzoek waren de gevolgen te bepalen voor de bodemligging en de stroombeelden ter plaatse van de IJsselkop. Om dit onderzoek uit te voeren is een schaalmodel gebouwd in locatie De Voorst van WL|Delft Hydraulics. Op de plattegrond in Fig. 4.8 is te zien dat de IJssel aan het einde en aan de buitenkant van een bocht afsplitst van de Nederrijn.

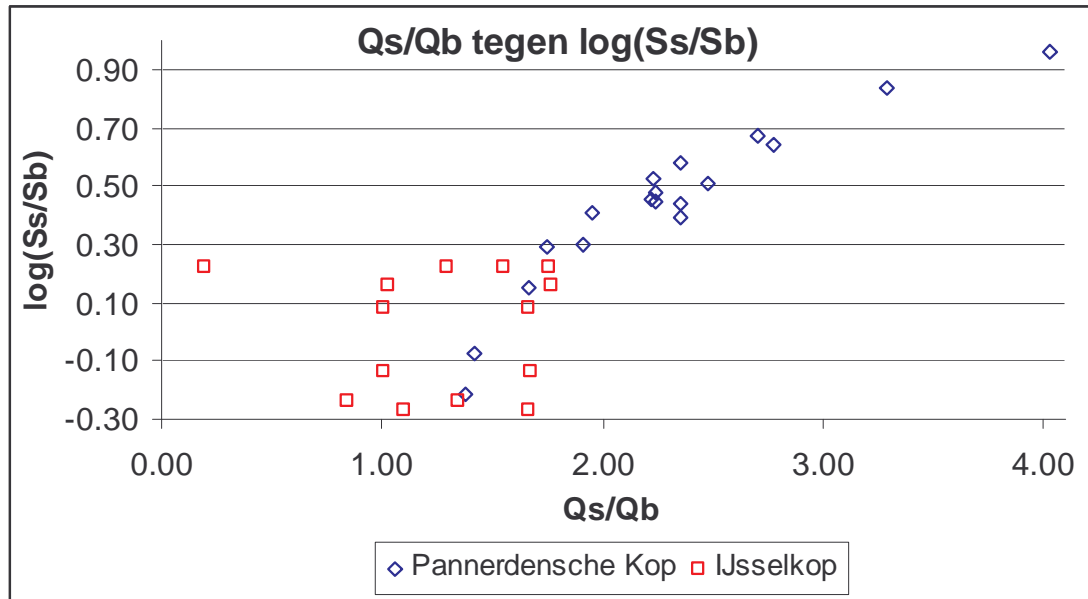
Conclusies waren dat de bodem ten opzichte van de huidige situatie maximaal 0,5 m zal stijgen of dalen. Dit werd acceptabel geacht. Verder blijkt bij een gestuwde Nederrijn de stroming aan het begin van de IJssel aanzienlijk te versnellen. Dit kan gevaar opleveren voor de scheepvaart.

In Tabel 4.2 zijn gegevens van de schaalmodellen weergegeven.

Tabel 4.2: Gegevens schaalmodellen.

auteur parameterrange	Pannerdensche Kop 1981	IJsselkop 1969
Q_m	0,181 – 0,278 m ³ /s	300 – 1050 m ³ /s
Q_s	0,105 – 0,203 m ³ /s	50 – 670 m ³ /s
Q_b	0,036 – 0,095 m ³ /s	250 – 447 m ³ /s
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,4 – 4,0	0,20 - 1,77
S_m	0,055 – 0,306 m ³ /h	40 – 80
S_s	0,021 – 0,243 m ³ /h	20 – 50
S_b	0,006 – 0,081 m ³ /h	25 – 41
$\frac{S_s}{S_b}$	0,6 - 9,1	0,54 – 1,67
B_m	300 m	140 m
B_s	240 m	100 m
B_b	100 m	75 m
$\frac{B_s}{B_b}$	2,4	1,33
C_m	42 m ^{1/2} /s	34 m ^{1/2} /s
C_s	38 m ^{1/2} /s	34 m ^{1/2} /s
C_b	32 m ^{1/2} /s	32 m ^{1/2} /s
i_m	0,0012	0,0013
i_s	0,0012	0,0015
i_b	0,0021	0,0012
h_m	1,4 m	5,4 m
h_s	1,4 m	5,0 m
h_b	1,2 m	4,0 m
u_m	1,70 m/s	2,9 m/s
u_s	1,55 m/s	2,6 m/s
u_b	1,63 m/s	2,5 m/s
Fr	0,11 – 0,14	0,40
<i>sub- of superkritisch</i>	subkritisch	subkritisch
Re	1,78 – 1,92*10 ⁶	13,6 – 17,3*10 ⁶
<i>(niet-) turbulent</i>	turbulent	turbulent
u/w	0,68 – 1,21	1,12 – 1,21
<i>soort transport</i>	bodem- en suspensietransport	bodem- en suspensietransport
D_{m50}	1,4 mm	3,2 mm
D_{s50}	1,3 mm	2,1 mm
D_{b50}	1,7 mm	4,8 mm
<i>spreiding D_m</i>	1,58	1,45
<i>spreiding D_s</i>	1,50	2,00
<i>spreiding D_b</i>	1,48	1,62
α	20°	15°
<i>vorm moedergeul</i>	gekromd, afsplitsing nevengeul op bochtovergang	gekromd, afsplitsing nevengeul aan buitenkant kromming

In Fig. 4.9 zijn de debiet- en sedimentverdeling tegen elkaar geplot.



Figuur 4.9: Debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ tegen sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ in schaalmodellen.

Bij de schaalmodellen lijkt er een lineair verband te bestaan tussen de debietverdeling en de sedimentverdeling. In tegenstelling tot de resultaten van de laboratoriumexperimenten.

4.2. Conclusies analyse waarnemingen

In de voorgaande paragraaf zijn de waarnemingen geanalyseerd. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd dat:

- in de laboratoriumexperimenten is gevarieerd in het debiet in de moedergeul, de debietverdeling en de hoek van afsplitsing;
- in de schaalmodellen is gevarieerd in het debiet in de moedergeul en de debietverdeling;
- de waarnemingen van Shafai-Bagestan op zich goede informatie opleveren over de invloed van de kromming van de moedergeul, maar bevatten geen gegevens over bijvoorbeeld de waterdiepte. Daarom zullen deze gegevens niet worden gebruikt bij de validatie.

De coëfficiënt c geeft de invloed weer van de debietverdeling en de hoek van afsplitsing op de sedimentverdeling. De vorm van c is als volgt:

- volgens Fig. 4.3 en 4.4 lijkt de sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ logaritmisch afhankelijk te zijn van de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$, dus $c \sim 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$. Uit bestudering van het gedrag van de functie $f(x) = 10^x$ blijkt dat deze functie voor kleine waarden van x vrij klein is. Bij grotere waarden voor x gaat de functie $f(x)$ zeer snel naar ∞ toe. Toepassen van de vorm $c \sim 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$ kan dus maar voor bepaalde waarden van $\frac{Q_s}{Q_b}$. Hoe het gedrag voor grote waarden van $\frac{Q_s}{Q_b}$ moet worden beschreven, is nu niet te bepalen, omdat daar geen gegevens over beschikbaar zijn;
- in Fig. 4.6 is de hoek van afsplitsing α uitgezet tegen de sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ voor de experimenten van Bulle en Shafai-Bagestan. Uit deze figuren is geen eenduidig verband af te

leiden tussen α en $\frac{S_s}{S_b}$. In het geval van Bulle (rechte moedergeul) is $\frac{S_s}{S_b}$ maximaal voor $\alpha = 120^\circ$, zodat voor de experimenten van Bulle geldt $c \sim 1 + n \cdot \sin \alpha$.

- Bij de experimenten van Shafai-Bagestan (gekromde moedergeul met afsplitsing aan buitenkant kromming) neemt de verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ lineair af bij een toenemende α , zodat voor deze experimenten geldt $c \sim (1 - m \cdot \alpha)$. Om meer informatie te krijgen over de invloed van de hoek van afsplitsing op de sedimentverdeling zijn extra simulaties nodig in *Delft3D*.

5. VALIDATIE SPLITSINGSPUNTRELATIE

In de voorgaande hoofdstukken is door middel van literatuurstudie, studie van 2-D riviermorfologie en analyse van waarnemingen een splitsingspuntrelatie opgesteld voor de sedimentverdeling bij riviersplitsingen. Deze relatie staat beschreven in Vergelijkingen (3.52) en (3.54):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{S_{sp} - S_{bs} + S_{ss}}{S_{bp} + S_{bs} - S_{ss}} \quad (5.1)$$

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)} \cdot c \quad (5.2)$$

In dit hoofdstuk wordt Vergelijking (5.1) gevalideerd door handberekeningen te vergelijken met de waarnemingen. Het sedimenttransport naar de hoofd- en nevengeul ten gevolge van de globale waterbeweging is gebaseerd op een model van Struiksmā [1983] en De Vriend *et al.* [2001]. Dit model is uitgebreid bewezen in De Vriend & Struiksmā [1983], Struiksmā *et al.* [1985] en Struiksmā & Crosato [1989]. Daarom wordt er vanuit gegaan dat de beschrijving van S_{sp} en S_{bp} correct zijn en zullen de berekeningen zich richten op de validatie van het sedimenttransport naar de hoofd- en nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging S_{ss} en S_{bs} .

In § 5.1 wordt Vergelijking (5.1) gevalideerd met behulp van de waarnemingen in laboratoriumexperimenten. In deze paragraaf wordt ook een vorm bepaald voor de coëfficiënt c . Vervolgens wordt de definitieve splitsingspuntrelatie gegeven in § 5.2.

5.1. Vergelijking berekeningen met waarnemingen

In deze paragraaf worden de resultaten getoond van berekeningen met Vergelijking (5.1). De resultaten zullen worden vergeleken met de waarnemingen. De berekeningen hebben tot doel te bepalen of de orde van grootte van de berekeningen overeen komen met de waarnemingen en wat de vorm van de coëfficiënt c is.

Uit Hoofdstuk 2 bleek dat de afmetingen van de neer, en dus c , afhankelijk zijn van het debiet in de moedergeul en de hoek van afsplitsing. Uit de analyse van de waarnemingen in Hoofdstuk 4 is bepaald dat de coëfficiënt c de volgende vorm heeft:

- de sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ lijkt logaritmisch afhankelijk te zijn van de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$, dus $c \sim 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$. Hierbij is aangetekend dat dit alleen voor kleine waarden van $\frac{Q_s}{Q_b}$ kan gelden;
- tussen de sedimentverdeling $\frac{S_s}{S_b}$ en de hoek van afsplitsing α is er geen eenduidig verband te bepalen.

Voor de het narekenen van de laboratoriumexperimenten zullen niet de waarnemingen van Shafai-Bagestan [1999] worden gebruikt. Hiervoor zijn er te weinig gegevens beschikbaar van de proefopstelling.

Uit Hoofdstuk 4 kon alleen een verband worden afgeleid tussen de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$ en de afmetingen van de neer. Vergelijking (5.1) zal worden gevalideerd voor een tweetal situaties:

rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul. Hiervoor worden de waarnemingen van Bulle en Riad gebruikt, zie § 5.1.2;

rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul. Hiervoor worden de waarnemingen van Roosjen gebruikt, zie § 5.1.1.

5.1.1. Rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul

Voor deze situatie zullen eerst de waarnemingen van Riad worden gebruikt. Riad had een grote range van debietverdelingen. Voor Bulle geldt dit niet, zodat zijn waarnemingen als controle zullen worden gebruikt.

Riad:

De waarnemingen van Riad kunnen worden gebruikt om Vergelijking (5.1) te valideren wat betreft de debietverdeling $\frac{Q_s}{Q_b}$. De nagerekende situaties en de invoerparameters zijn weergegeven in Tabel 5.1. De

resultaten zijn weergegeven in Fig. 5.1 tot en met 5.3. In deze figuren zijn alleen grafieken weergegeven. Numerieke gegevens staan in Bijlage D.

Tabel 5.1: Invoerparameters handberekeningen Riad.

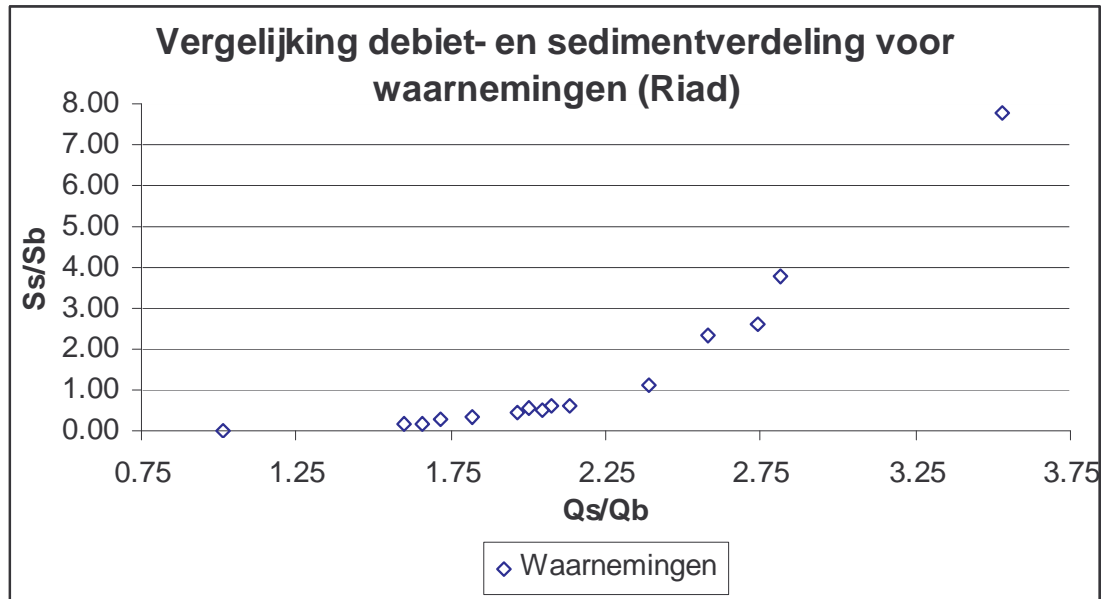
Hierin is:

nummer berekening		Ri1	Ri2	Ri3
parameter	waarnemingen	$c = 1$	$c = e \cdot 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = e \cdot \left(\frac{B_s}{B_b}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{Q_b}}$
Q_m	60,5 – 111,3 l/s	60,5 - 111,3 l/s	60,5 – 111,3 l/s	60,5 – 111,3 l/s
Q_s	30,4 - 70,6 l/s	30,4 - 70,6 l/s	30,4 - 70,6 l/s	30,4 - 70,6 l/s
Q_b	16,0 - 41,9 l/s	16,0 - 41,9 l/s	16,0 - 41,9 l/s	16,0 - 41,9 l/s
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,01 - 3,53	1,01 - 3,53	1,01 - 3,53	1,01 - 3,53
B_m	0,8 m	0,8 m	0,8 m	0,8 m
B_s	0,8 m	0,8 m	0,8 m	0,8 m
B_b	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m
$\frac{B_s}{B_b}$	1,6	1,6	1,6	1,6
C	$46,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$46,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$46,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$46,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
i	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
h_m	22,5 – 37,1 cm	22,5 – 37,1 cm	22,5 – 37,1 cm	22,5 – 37,1 cm
D	$D_{50} = 0,3 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,3 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,3 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,3 \text{ mm}$
α	45°	45°	45°	45°
a (calibratiefactor)	5	5	5	5
b (calibratiefactor)	2,75	2,75	2,75	2,75
d (calibratiefactor)	0,9	0,9	0,9	0,9
e (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	0,00225	0,2
f (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	niet in vgl.	1

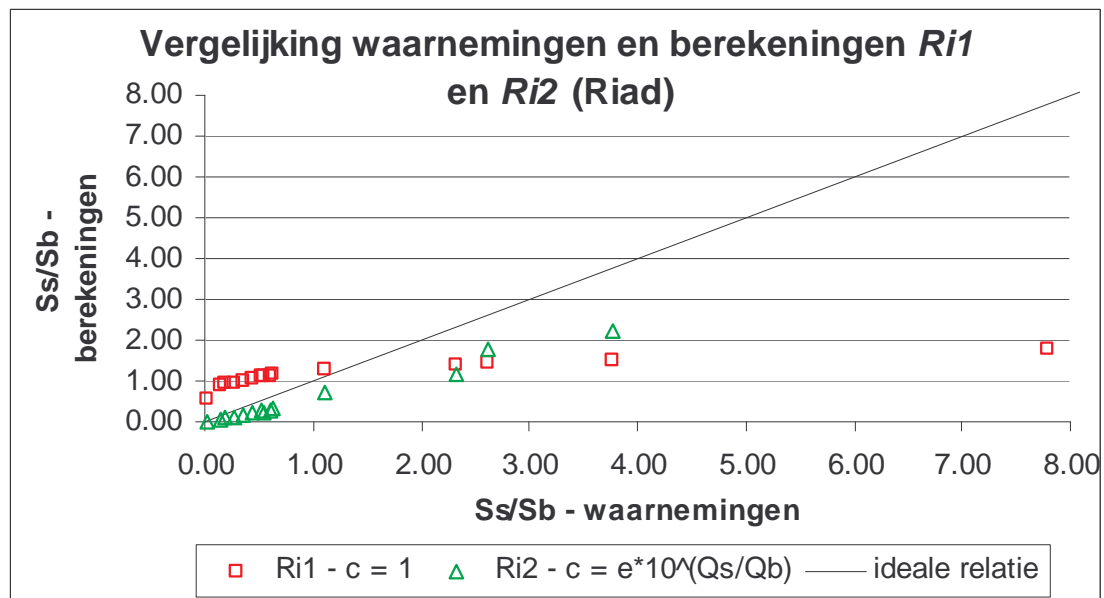
calibratiefactor voor coëfficiënt c die de invloed van de niet[-]

gegenereerde impuls weergeeft

f calibratiefactor die de invloed van de debietverdeling in de [-]
macht van coëfficiënt c weergeeft



Figuur 5.1: Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Riad.

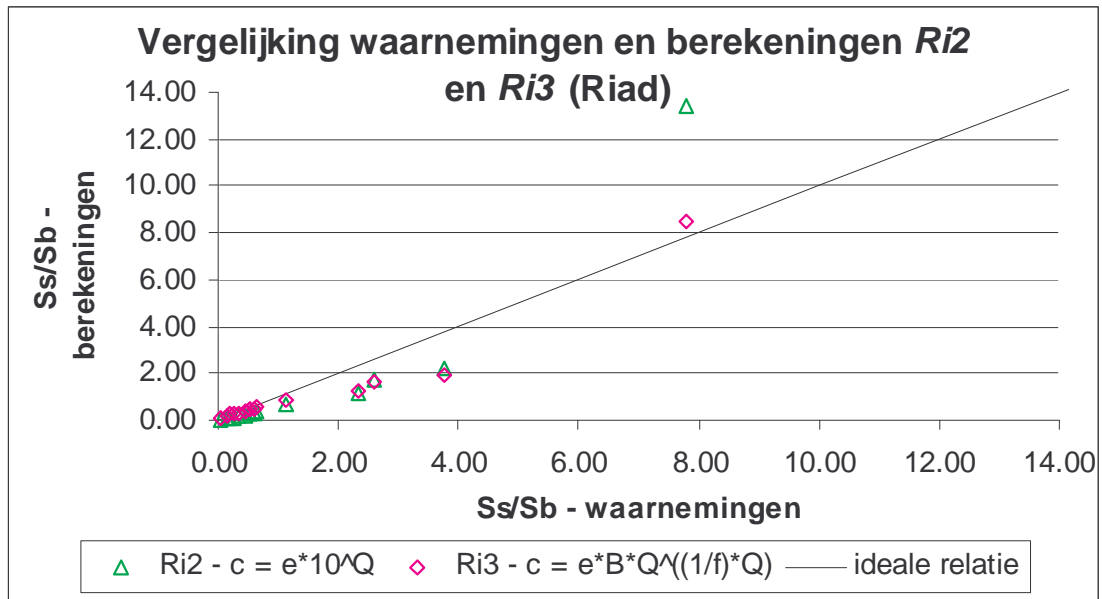


Figuur 5.2: Vergelijkingen waarnemingen en berekeningen $Ri1$ en $Ri2$ wat betreft sedimentverdeling voor Riad. In $Ri2$ geldt $e = 0,00225$.

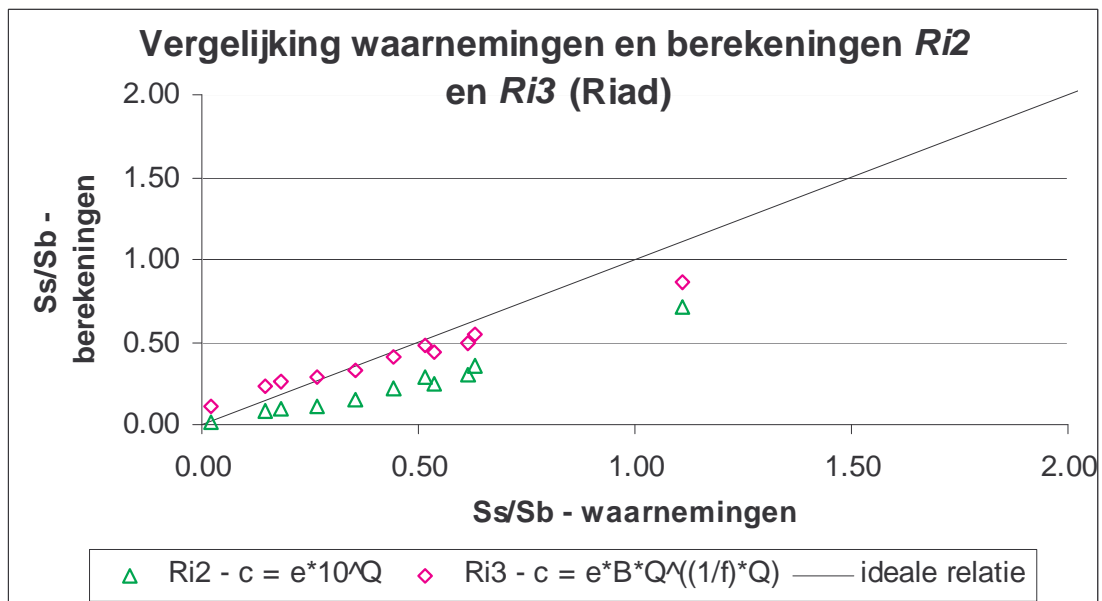
Uit de vergelijking van de waarnemingen met de berekeningen kunnen twee conclusies worden getrokken:

- de resultaten van berekening $Ri1$ geeft een lineair verband tussen de debiet- en de sedimentverdeling. De coëfficiënt c is dus noodzakelijk voor een correcte berekening van de sedimentverdeling;
- de grafiek van de resultaten van berekening $Ri2$ heeft dezelfde trend als de waarnemingen.

Uit nadere analyse blijkt dat de beste vorm voor de coëfficiënt c is $c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b} \right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$, zie Fig. 5.3.



5.3a: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ri2$ en $Ri3$ wat betreft sedimentverdeling voor Riad voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0; \rightarrow)$. In $Ri2$ geldt $e = 0,00225$ en in $Ri3$ geldt $e = 0,2$.



5.3b: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ri2$ en $Ri3$ wat betreft sedimentverdeling voor Riad voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0; 2]$. In $Ri2$ geldt $e = 0,00225$ en in $Ri3$ geldt $e = 0,2$ en $f = 1$.

Figuur 5.3: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ri2$ en $Ri3$ wat betreft debiet- en sedimentverdeling voor Riad. In $Ri2$ geldt $e = 0,00225$ en in $Ri3$ geldt $e = 0,2$ en $f = 1$.

Bulle:

Vergelijking van waarnemingen en berekeningen voor Bulle [1926] gaven ook goede resultaten. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Bijlage D.

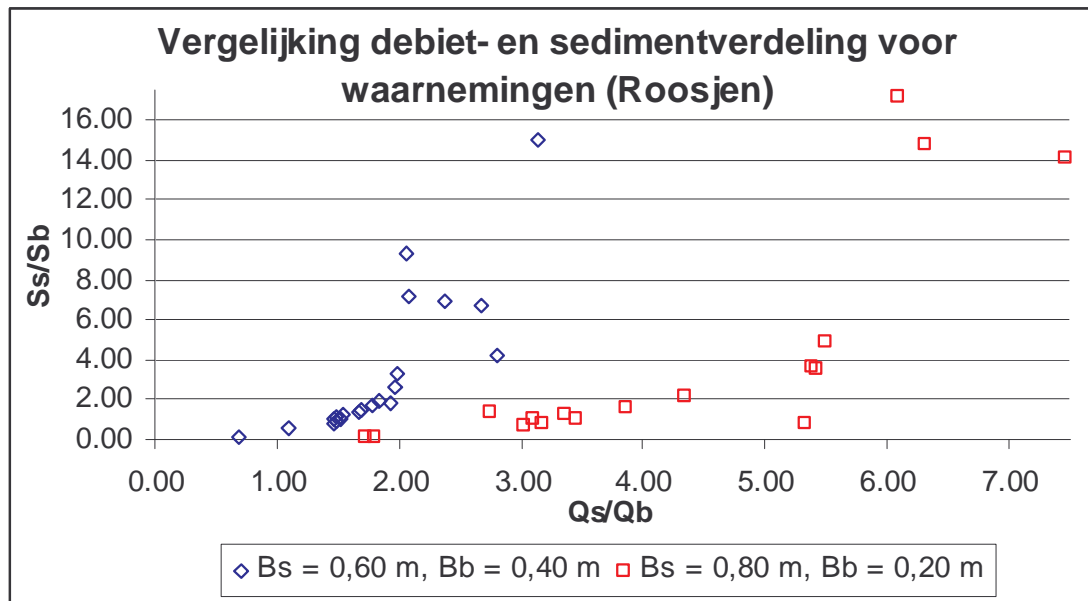
5.1.2. Rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul

Roosjen:

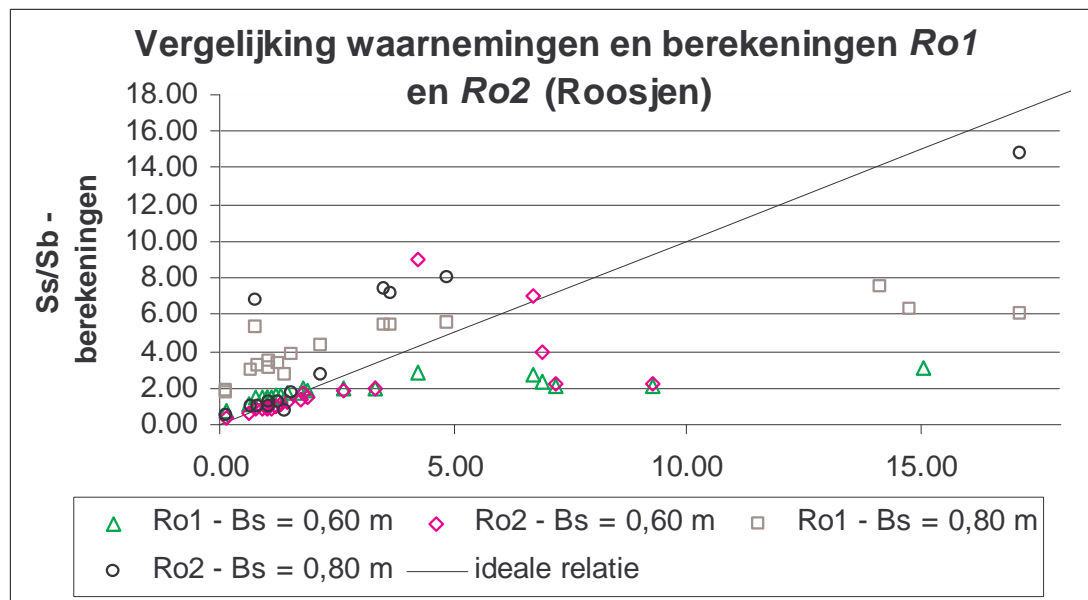
De waarnemingen van Roosjen & Zwanenburg [1995] worden gebruikt om Vergelijking (5.1) te valideren in het geval van een rechte moedergeul en zowel een afbuigende hoofd- als nevengeul. De nagerekende situaties en de invoerparameters zijn weergegeven in Tabel 5.2. De resultaten zijn weergegeven in Fig. 5.4 en 5.5. In deze figuren zijn alleen grafieken weergegeven. Numerieke gegevens staan in Bijlage D.

Tabel 5.2: Invoerparameters handberekeningen Roosjen.

nummer berekening		Ro1	Ro2
parameter	waarnemingen	$c = 1$	$c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$
Q_m	10,15 - 38,75 l/s	10,15 - 38,75 l/s	10,15 - 38,75 l/s
Q_s	7,38 - 32,71 l/s	7,38 - 32,71 l/s	7,38 - 32,71 l/s
Q_b	2,45 - 15,57 l/s	2,45 - 15,57 l/s	2,45 - 15,57 l/s
$\frac{Q_s}{Q_b}$	0,68 - 7,47	0,68 - 7,47	0,68 - 7,47
B_m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
B_s	0,6 - 0,8 m	0,6 - 0,8 m	0,6 - 0,8 m
B_b	0,2 - 0,4 m	0,2 - 0,4 m	0,2 - 0,4 m
$\frac{B_s}{B_b}$	1,50 - 4	1,50 - 4	1,50 - 4
C	30 m ^{1/2} /s	30 m ^{1/2} /s	30 m ^{1/2} /s
i	0,0013	0,0013	0,0013
h_m	10 cm	10 cm	10 cm
D	$D_{50} = 0,27$ mm	$D_{50} = 0,27$ mm	$D_{50} = 0,27$ mm
α	26°	26°	26°
a (calibratiefactor)	5	5	5
b (calibratiefactor)	2,75	2,75	2,75
d (calibratiefactor)	0,9	0,9	0,9
e (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	0,5
f (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	$B_s = 0,60$ m: $f = 1$ $B_s = 0,60$ m: $f = 2$

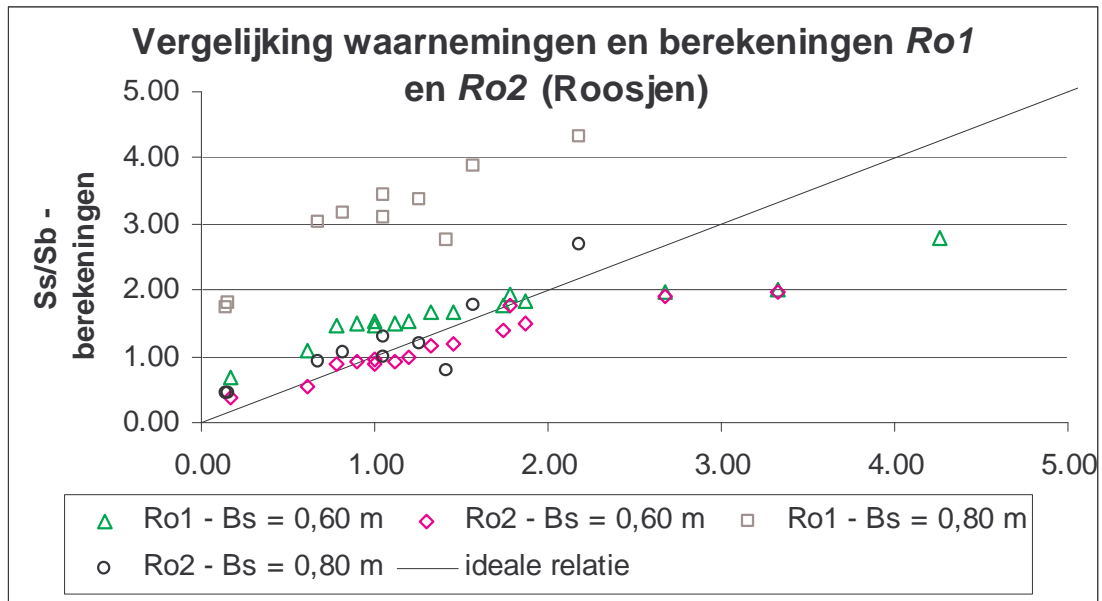


Figuur 5.4: Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Roosjen.



5.5a: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ro1$ en $Ro2$ wat betreft sedimentverdeling voor Roosjen voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0; \rightarrow)$.

In $Ro3$ geldt $e = 0,5$ en $f = 1$ ($B_s = 0,60$ m en $B_b = 0,40$ m) of 2 ($B_s = 0,80$ m en $B_b = 0,20$ m).



5.5b: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ro1$ en $Ro2$ wat betreft sedimentverdeling voor Roosjen voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0;5]$. In

$Ro2$ geldt $e = 0,5$ en $f = 1$ ($B_s = 0,60$ m en $B_b = 0,40$ m) of 2 ($B_s = 0,80$ m en $B_b = 0,20$ m).

Figuur 5.5: Vergelijking waarnemingen en berekeningen $Ro1$ en $Ro2$ voor Roosjen. In $Ro2$ geldt $e = 0,5$ en $f = 1$ ($B_s = 0,60$ m en $B_b = 0,40$ m) of 2 ($B_s = 0,80$ m en $B_b = 0,20$ m).

5.2. Conclusies vergelijking experiment met concept-splitsingspuntrelatie

De vergelijking van de berekeningen met de waarnemingen geeft aan dat met de afgeleide relatie de goede orde van grootte van de sedimentverdeling wordt berekend. Belangrijke aantekening bij deze

conclusie is dat de coëfficiënt c in de vorm $c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \frac{Q_s}{Q_b}}$ anders is voor verschillende situaties.

Voor de verschillende situaties die in dit hoofdstuk zijn gevalideerd, kan het volgende worden gezegd:

- Rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$; $f = 1$;
- Rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$ en
 - $\frac{B_b}{B_s} = 0,67$: $f = 1$;
 - $\frac{B_b}{B_s} = 0,25$: $f = 2$.

Om de exacte waarden van e en f en de invloed van $\frac{B_b}{B_s}$ te bepalen, is extra onderzoek nodig.

Belangrijke aantekening bij deze conclusie is dat de coëfficiënt c in de vorm $c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{Q_s}{Q_b}}$ slechts

toepasbaar is voor $\frac{Q_s}{Q_b} \in [0;4]$. Voor grotere waarden van de debietverdeling, moet c worden aangepast.

Dit is gedaan bij de vergelijking voor de proefopstelling van Roosjen ($B_s = 0,80$ m, $B_b = 0,20$ m). In dat geval geldt dat $f = 2$. Dit is een belangrijk punt, omdat de in dit afstudeeronderzoek afgeleide splitsingspuntrelatie de sedimentverdeling bij een splitsingspunt op kleine schaal moet kunnen voorspellen (Een splitsingspunt op kleine schaal is de afsplitsing van een nevengeul van de hoofdgeul die

na enige tijd weer samenvloeien. Deze nevengeul ligt in de uiterwaarden, zie § 1.1.). In zo'n geval is de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} \approx 20$.

In de literatuur zijn vrijwel alleen waarnemingen beschikbaar voor $\frac{Q_s}{Q_b} \in [0;5]$, waarbij in de experimenten van Roosjen de grootste waarden zijn gemeten. Een oplossing voor de vorm van de coëfficiënt c is hiermee niet te bepalen. Met de ervaring van de validatie van Vergelijking (5.1) voor de experimenten van Roosjen kan een voorschot voor de vorm van de coëfficiënt c zijn $c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$. De calibratiefactor f zou dan moeten worden aangepast voor bepaalde ranges van $\frac{Q_s}{Q_b}$. In Hoofdstuk 6 zal worden bepaald of *Delft3D* geschikt is om de stroming bij een splitsingspunt na te bootsen. Indien dit zo is, kunnen op een eenvoudige manier waarnemingen worden gegenereerd voor $\frac{Q_s}{Q_b} > 5$.

6. KWALITATIEVE VERGELIJKING BULLE EN *DELFT3D*

In de twee voorgaande hoofdstukken zijn de waarnemingen uit de literatuur geanalyseerd en gebruikt om de opgestelde splitsingspuntrelatie te valideren. Uit de analyse en validatie bleek dat er een beperkt aantal waarnemingen beschikbaar is voor de sedimentverdeling bij een splitsingspunt in een rivier. Met name de debietverdeling bleek zeer laag gehouden. In het geval van een nevengeul die in de uiterwaarden ligt en na enige afstand weer samenvloeit met de hoofdgeul is de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} \approx 20$. Met

behulp van numerieke modelleringssoftware zou op een betrekkelijk eenvoudige manier extra waarnemingen kunnen worden gegenereerd.

De vergelijking is op twee punten gemaakt, namelijk de nabootsing van de waterbeweging en de sedimentbeweging. Eerst zal de waterbeweging volgens *Delft3D* worden vergeleken met Bulle, zie § 6.1. Vervolgens gebeurt hetzelfde voor de sedimentbeweging in § 6.2. § 6.3 bevat de conclusies over de vergelijking.

6.1. Vergelijking waterbeweging

Bulle [1926] heeft zeer nauwkeurige tekeningen gemaakt van het stroombeeld bij verschillende debieten en hoeken van afsplitsing. Bij de vergelijking van de waterbeweging met de simulaties *Delft3D* is per situatie een simulatie gedaan met gelijke benedenstroomse waterstanden in de hoofd- en nevengeul en een simulatie met een gedwongen gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul. Een gelijke debietverdeling werd bereikt door de benedenstroomse waterstand in de nevengeul te manipuleren. De simulaties in *Delft3D* beschrijven de 3-D waterbeweging.

6.1.1. $\alpha = 30^\circ$

In de eerste simulatie zijn de instellingen van Bulle gevolgd en waren de benedenstroomse waterstand in de hoofd- en nevengeul gelijk. Bij deze simulatie bleek er een scheve debietverdeling te ontstaan van

$\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{3,40}{1,60} = 2,13$. In een tweede simulatie is de benedenstroomse waterstand in de nevengeul zo

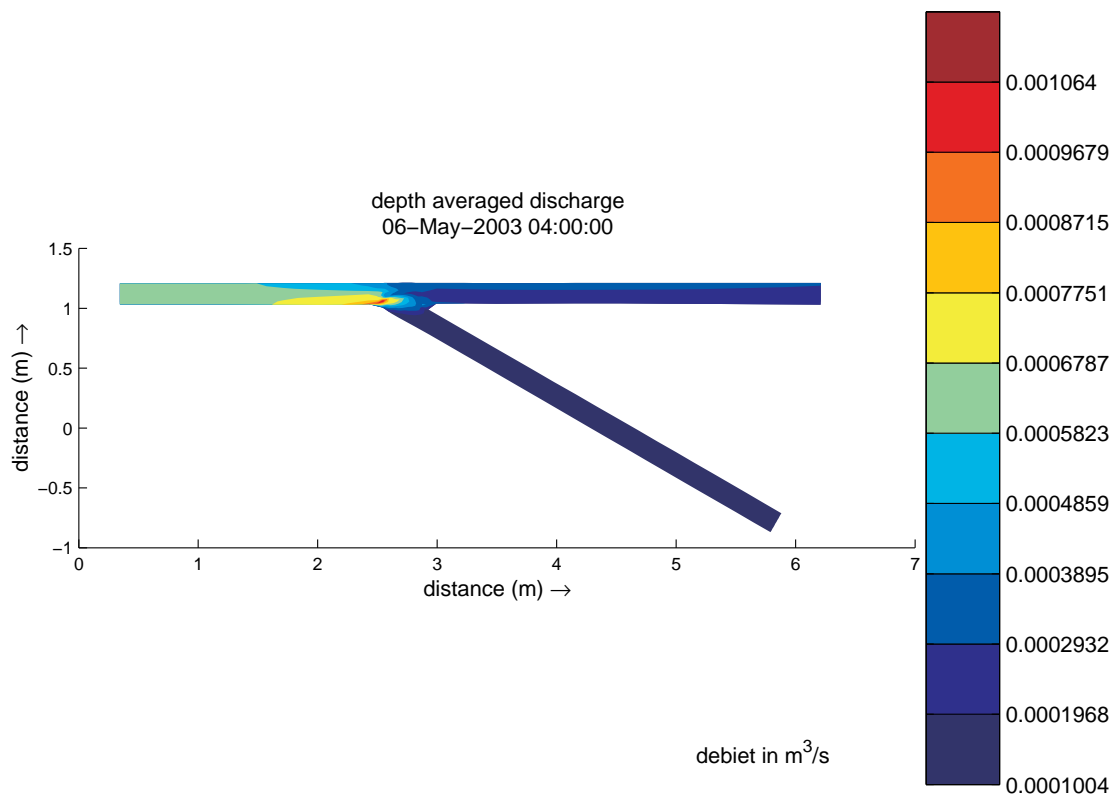
gemanipuleerd dat er een nagenoeg gelijke debietverdeling van $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{2,60}{2,40} = 1,08$ optrad. Beide

simulaties zijn vergeleken met het stroombeeld van Bulle.

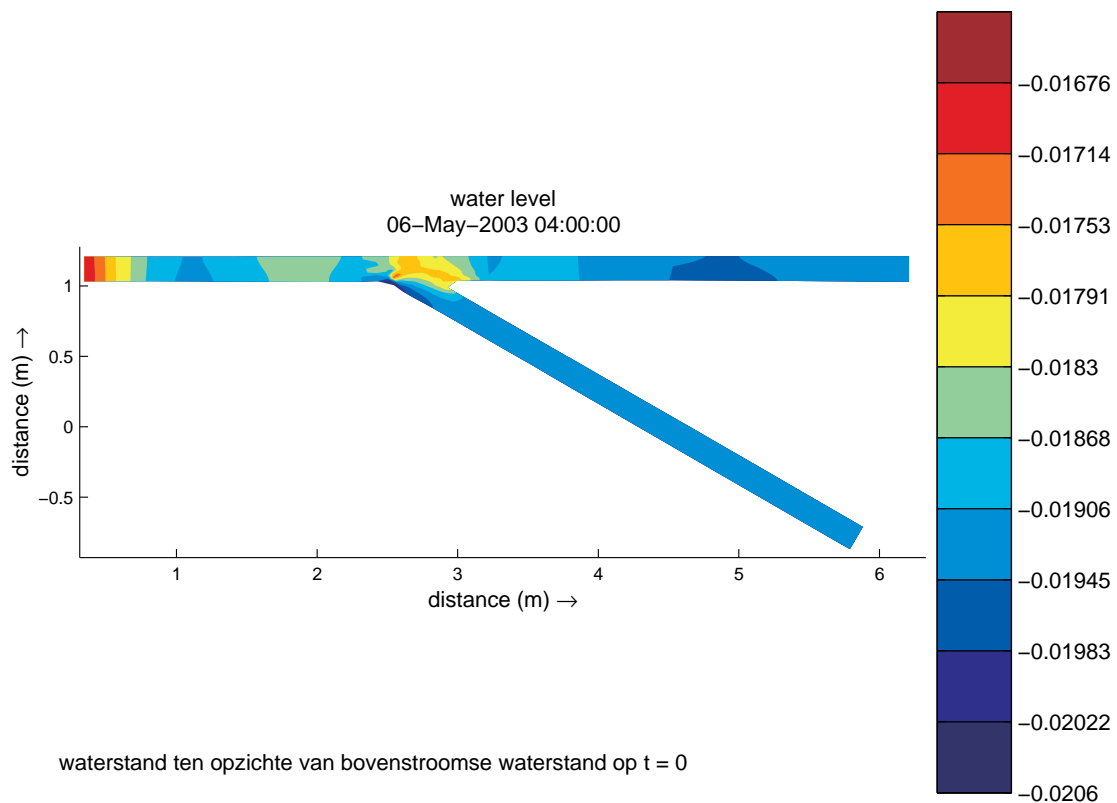
Tabel 6.1 bevat een lijstje met de figuren die zijn weergegeven van de eerste simulatie.

Tabel 6.1: Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke benedenstroomse waterstand voor de hoofd- en nevengeul.

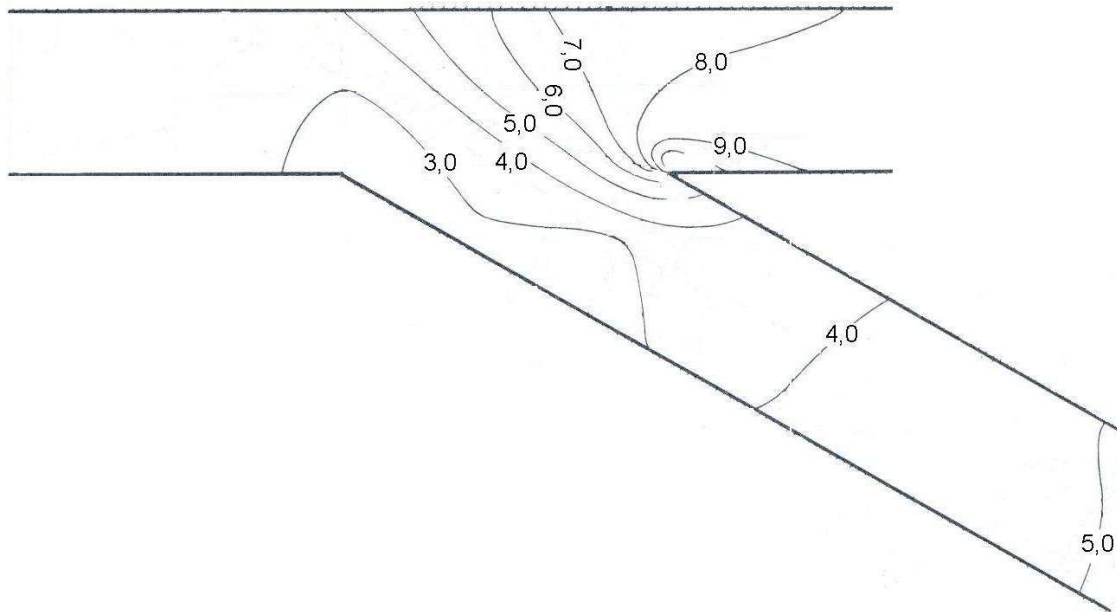
nummer figuur	bron	doel figuur
6.1	<i>Delft3D</i>	beschrijving debiet
6.2	<i>Delft3D</i>	beschrijving waterniveau
6.3	Bulle	beschrijving waterniveau
6.4	Bulle, <i>Delft3D</i>	vergelijking beschrijving waterniveau volgens verschillende bronnen



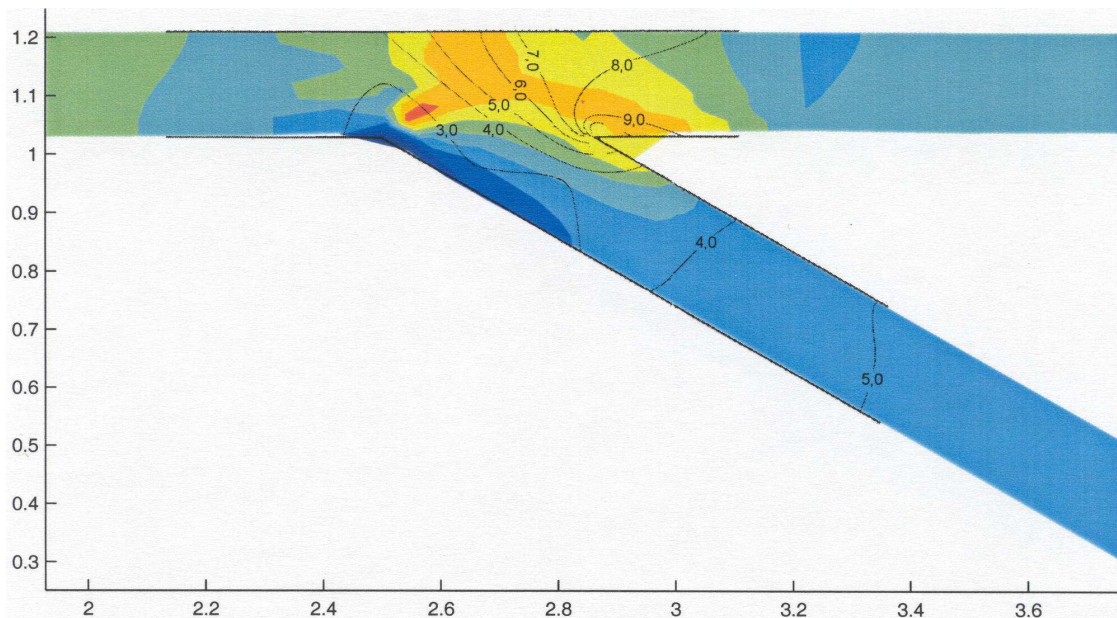
Figuur 6.1: Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.2: Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.3: Waterniveau volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.4: Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul. Voor de beschrijving volgens *Delft3D* is een close-up genomen van Fig. 6.2.

Analyse van Fig. 6.1 tot en met 6.4 geeft aan dat *Delft3D* kwalitatief gezien het stroombeeld bij een splitsingspunt goed nabootst. In Fig. 6.2 zijn de volgende elementen te zien:

- er ontstaat een dwarsverhang ter plaatse van het splitsingspunt met het laagste waterniveau bij de oeverknik. Ten gevolge van de daling van de waterdiepte gaat het water bij de oever van de oeverknik in de moedergeul sneller stromen (zie Fig. 6.1);
- benedenstrooms van de splitsingskop is er een dwarsverhang in de hoofdgeul met het laagste waterniveau bij de oever tegenover het splitsingspunt. Dit dwarsverhang duidt op een correctie van de stromingsrichting die eerst in zijn geheel is afgebogen richting nevengeul;
- het dwarsverhang ter plaatse van het splitsingspunt wordt door de stroming in de nevengeul over een grotere afstand vastgehouden dan door de stroming in de hoofdgeul;

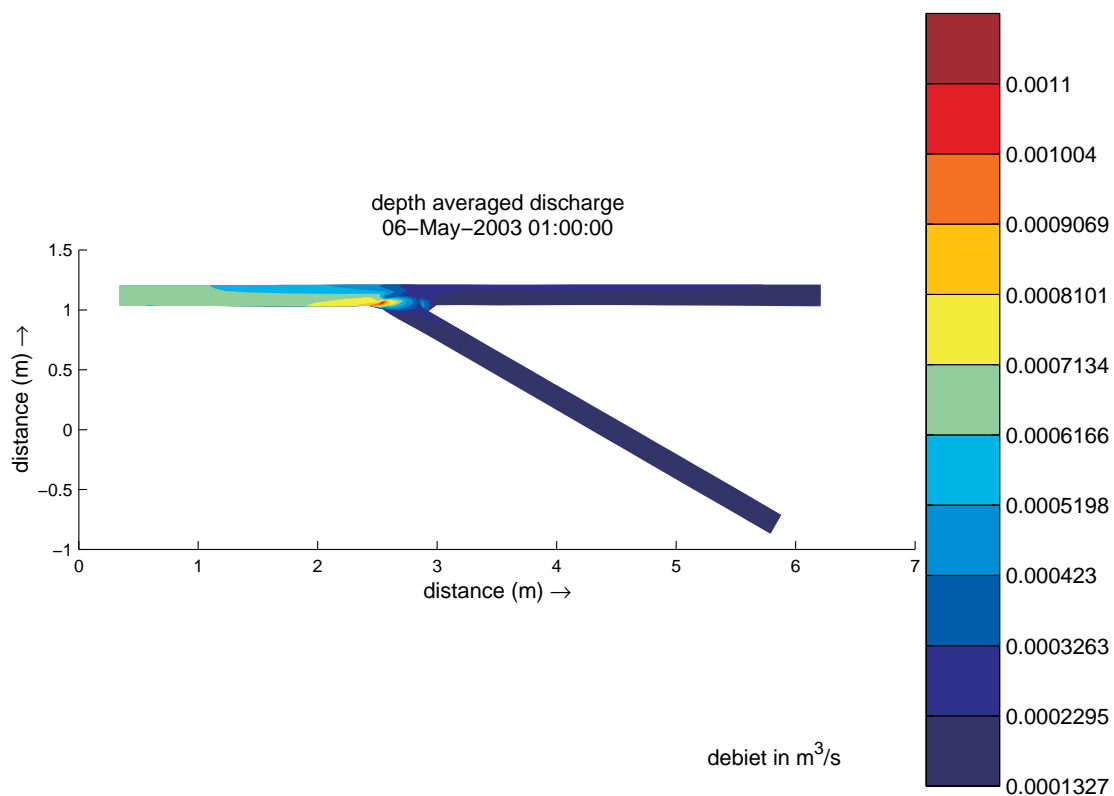
- in Fig. 6.1 is te zien dat er in de hoofdgeul continu een verschil is in de debietverdeling over de breedte. Verder is te zien dat ter plaatse van de oeverknik van de moedergeul naar de nevengeul het debiet zeer snel afneemt naar een lage waarde. Dit kan duiden op een neer;
- een verschil tussen Bulle en *Delft3D* is dat bij Bulle vanaf het begin van het splitsingspunt de waterstand alleen maar stijgt. In de simulatie met *Delft3D* is er een hoogste waterstand ter plaatse van het splitsingspunt, waarna de waterstand in de hoofdgeul continu en zeer langzaam daalt.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat het stroombeeld kwalitatief gezien vrijwel gelijk is aan wat in Hoofdstuk 2 is beschreven. In Fig. 6.4 zijn wat afwijkingen te vinden ter plaatse van de splitsingskop, omdat de splitsingskop in het grid van *Delft3D* wat verder benedenstrooms ligt dan in het geval van Bulle. Bij een correctie hiervoor in gedachten zijn de stroombeelden volgens Bulle en *Delft3D* nagenoeg gelijk.

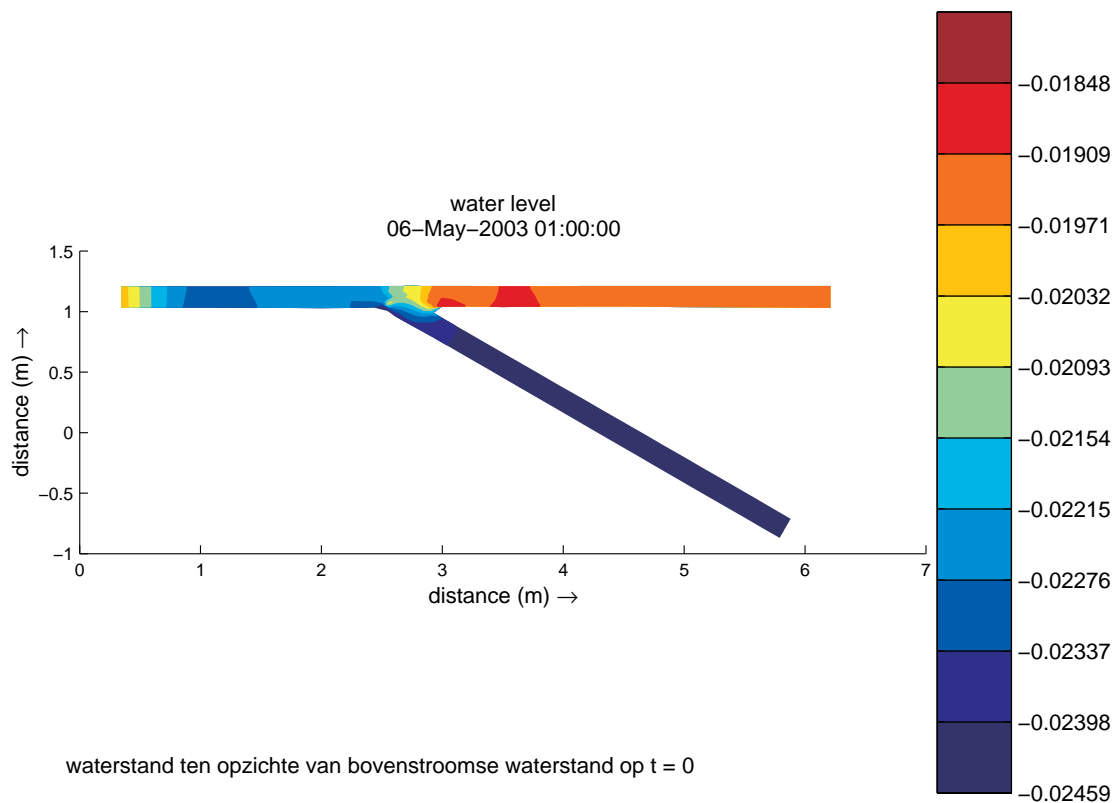
Tabel 6.2 bevat een lijstje met de figuren die zijn weergegeven voor de tweede simulatie. In deze simulatie is de benedenstroomse waterstand in de nevengeul met 0,5 mm verlaagd. Hierdoor ontstond er een gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul. Op een beginwaterstand van 7,0 mm is dit een verlaging van 7 %.

Tabel 6.2: Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.

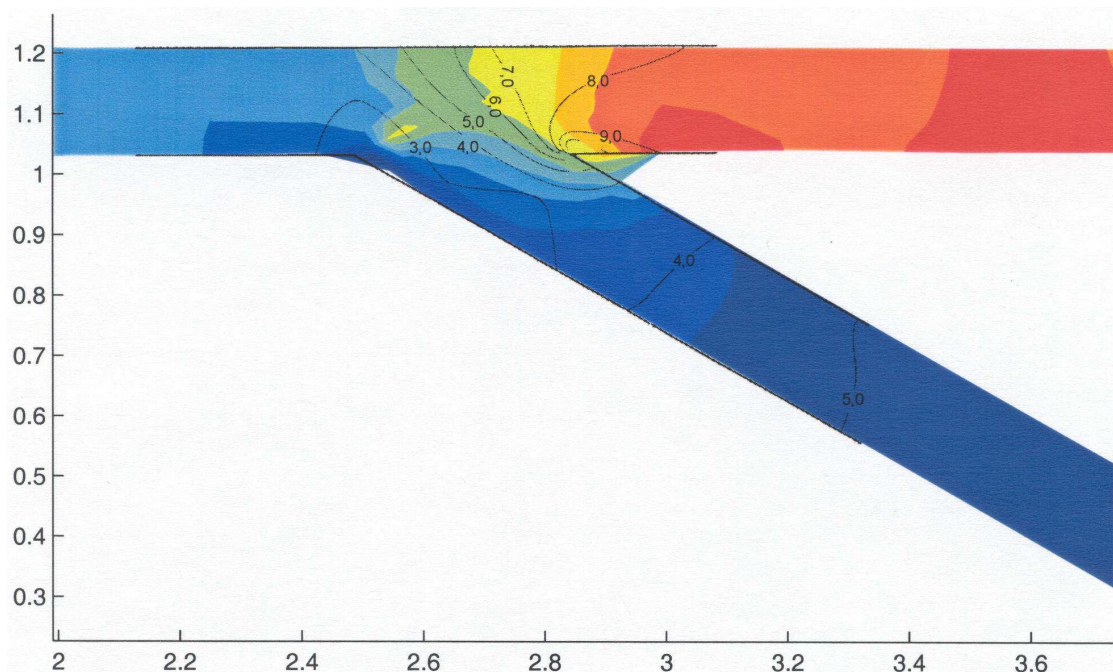
nummer figuur	bron	doel figuur
6.5	<i>Delft3D</i>	beschrijving debiet
6.6	<i>Delft3D</i>	beschrijving waterniveau
6.7	Bulle, <i>Delft3D</i>	vergelijking beschrijving waterniveau volgens verschillende bronnen



Figuur 6.5: Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.6: Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.7: Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul. Voor de beschrijving volgens *Delft3D* is een close-up genomen van Fig. 6.6.

Het stroombeeld volgens de tweede simulatie komt beter overeen met het stroombeeld volgens Bulle. Het punt van verschil in de eerste simulatie met het stroombeeld volgens Bulle, is nu veranderd in een overeenkomst. Het betreft de stijging van de waterstand in de hoofdgeul benedenstrooms van de splitsingskop.

6.1.2. $\alpha = 60^\circ$

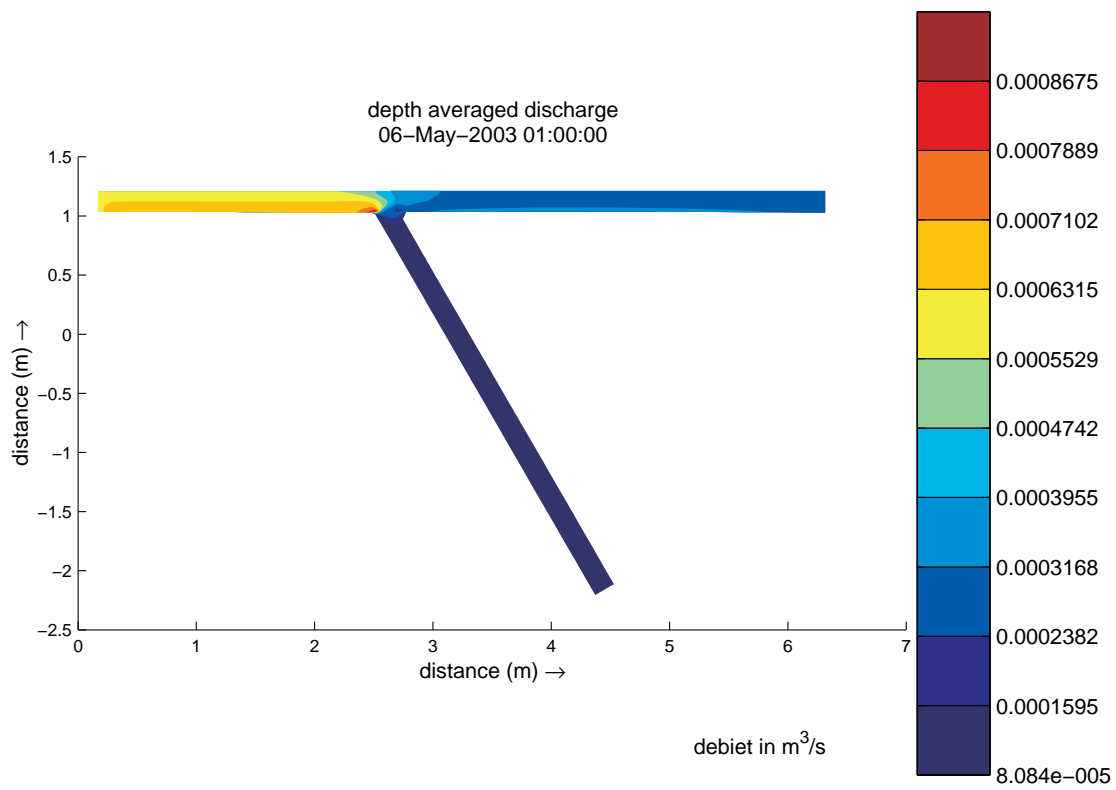
In de eerste simulatie zijn de benedenstroomse waterstanden in de hoofd- en nevengeul gelijk gehouden.

In dat geval is de verhouding $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{3,40}{1,60} = 2,13$. Tabel 6.3 bevat een lijstje met de figuren die zijn

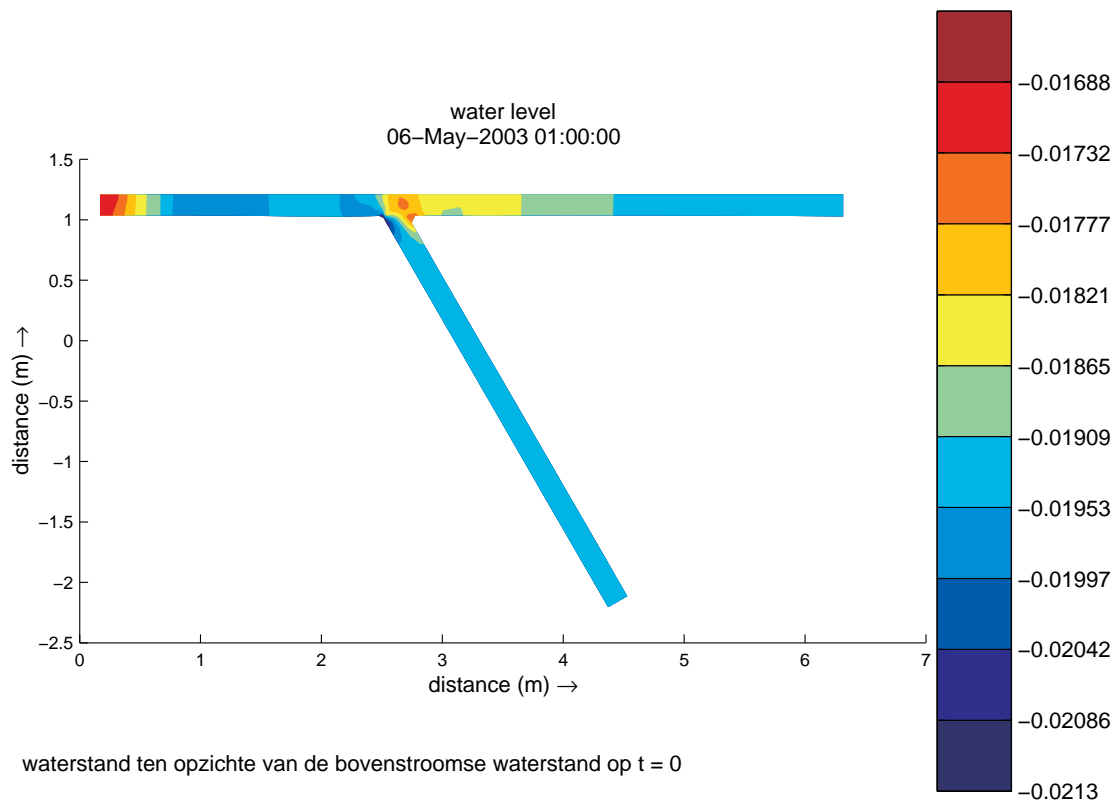
weergegeven van de eerste simulatie.

Tabel 6.3: Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke benedenstroomse waterstand voor de hoofd- en nevengeul.

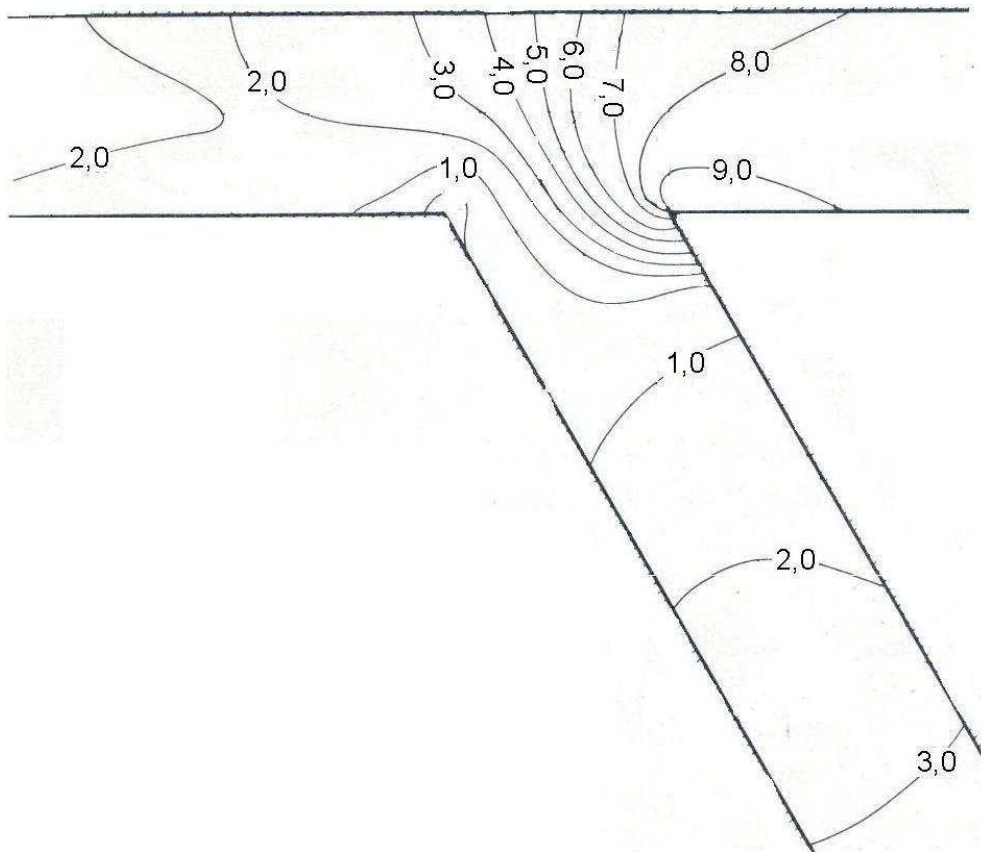
<i>nummer figuur</i>	<i>bron</i>	<i>doel figuur</i>
6.8	<i>Delft3D</i>	beschrijving debiet
6.9	<i>Delft3D</i>	beschrijving waterniveau
6.10	Bulle	beschrijving waterniveau
6.11	Bulle, <i>Delft3D</i>	vergelijking beschrijving waterniveau volgens verschillende bronnen



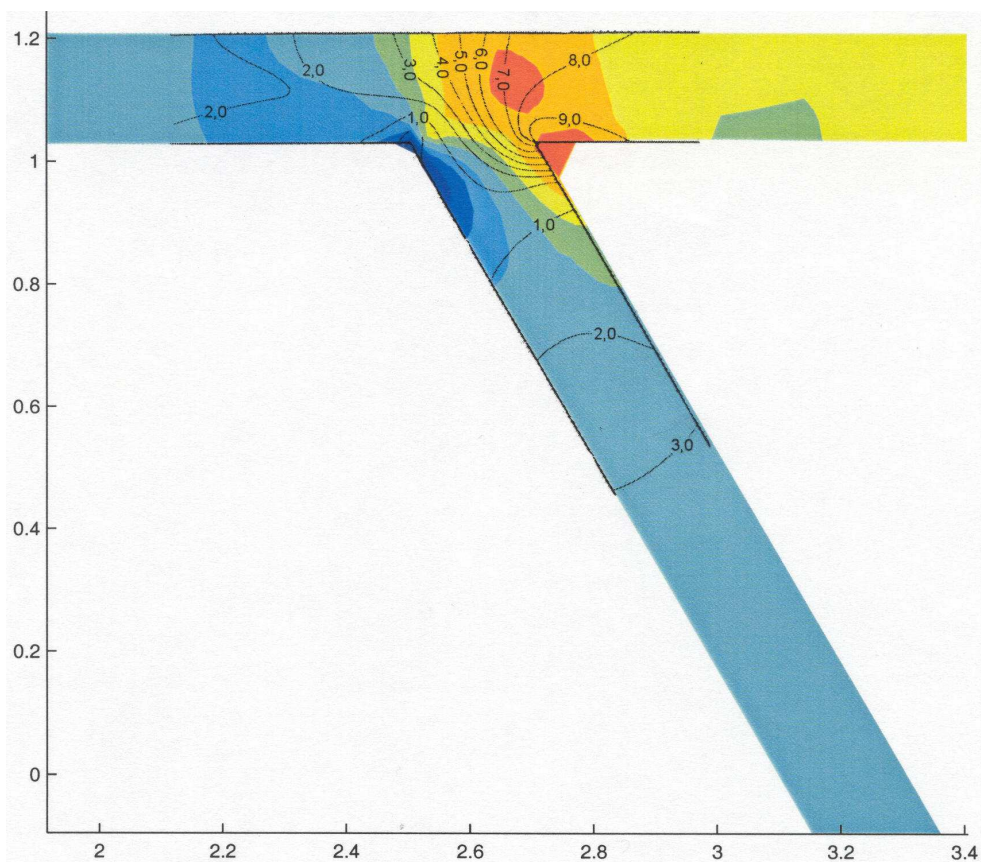
Figuur 6.8: Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.9: Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.10: Waterniveau volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul.

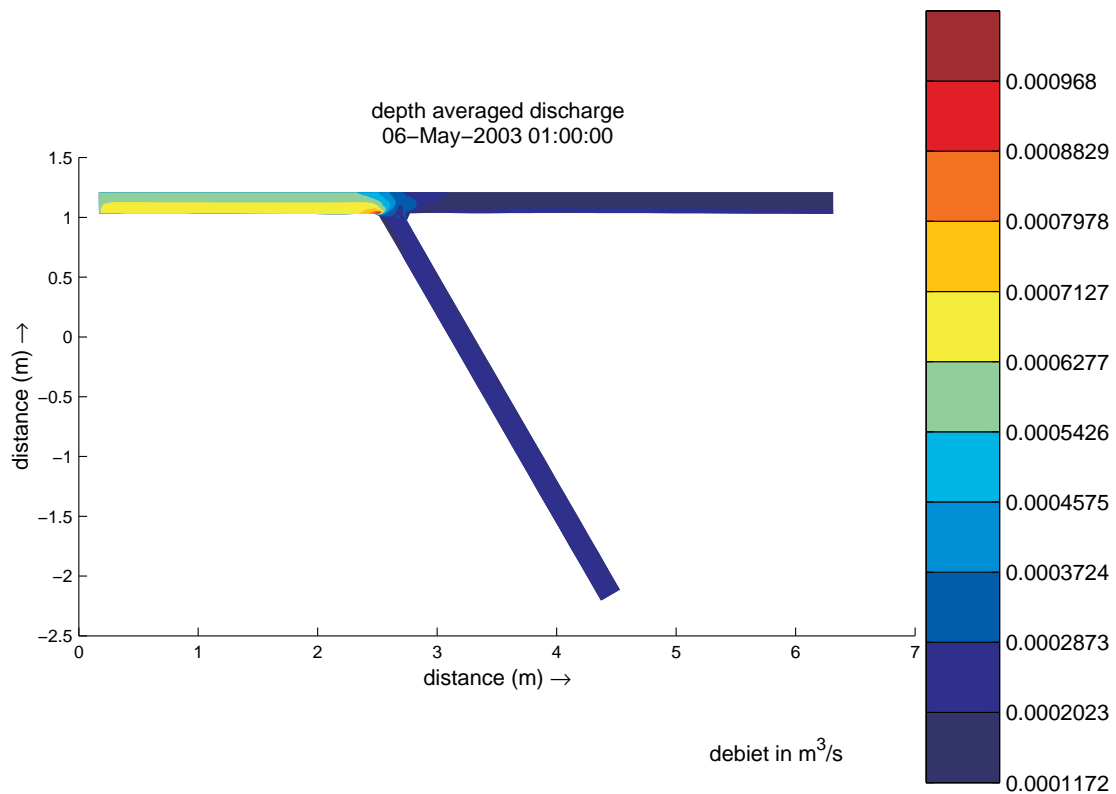


Figuur 6.11: Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul. Voor de beschrijving volgens *Delft3D* is een close-up genomen van Fig. 6.9.

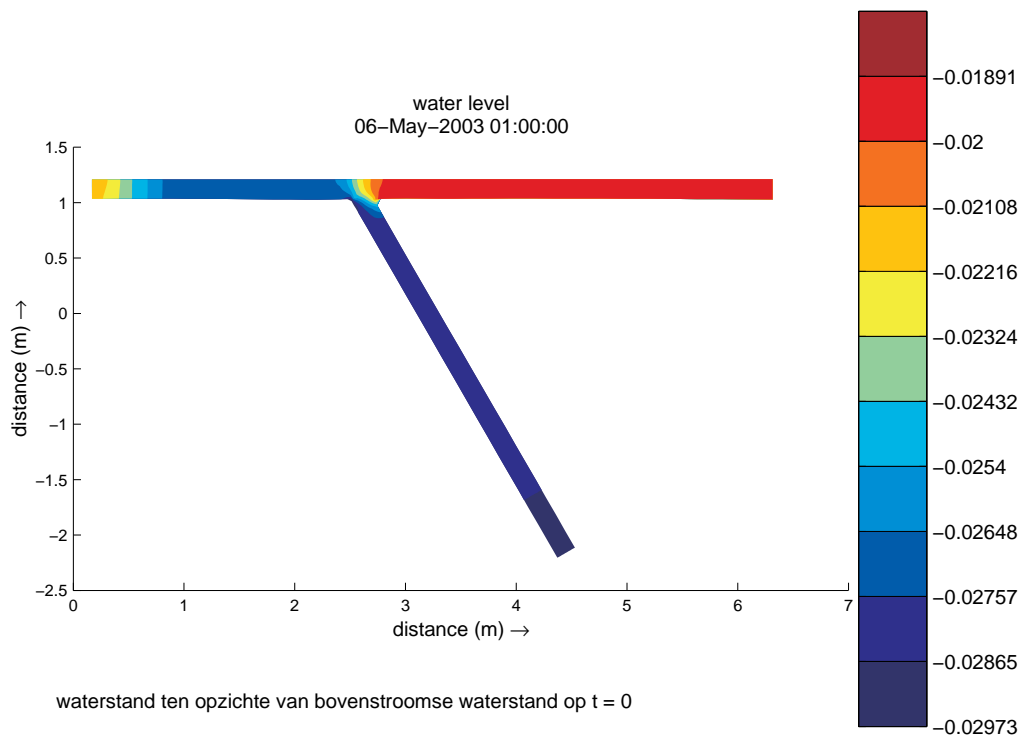
Tabel 6.4 bevat een lijstje met de figuren die zijn weergegeven voor de tweede simulatie. In deze simulatie is de benedenstroomse waterstand in de nevengeul met 0,9 mm verlaagd. Hierdoor ontstond er een nagenoeg gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul van $\frac{Q_s}{Q_b} = \frac{3,40}{1,60} = 2,13$. Op een beginwaterstand van 7,0 mm is dit een verlaging van 13 %.

Tabel 6.4: Figuren die het stroombeeld beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$ in het geval van gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.

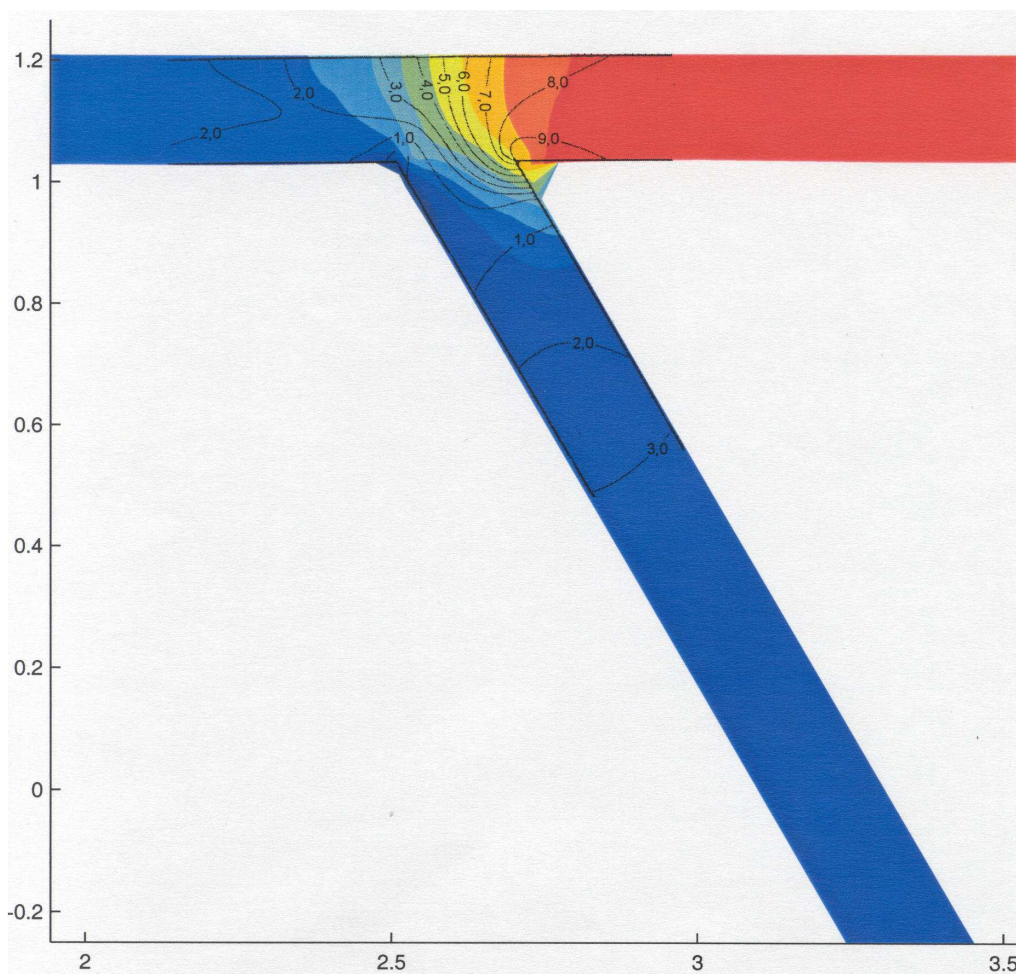
nummer figuur	bron	doel figuur
6.12	<i>Delft3D</i>	beschrijving debiet
6.13	<i>Delft3D</i>	beschrijving waterniveau
6.14	Bulle, <i>Delft3D</i>	vergelijking beschrijving waterniveau volgens verschillende bronnen



Figuur 6.12: Debietverdeling volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.13: Waterniveau volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul.



Figuur 6.14: Vergelijking beschrijving waterniveau volgens Bulle en volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke debietverdeling over de hoofd- en nevengeul. Voor de beschrijving volgens *Delft3D* is een close-up genomen van Fig. 6.13.

In de situatie dat $\alpha = 60^\circ$ kan dezelfde vergelijking worden gemaakt als in de situatie dat $\alpha = 30^\circ$. Verschil met Bulle in de eerste simulatie (gelijke benedenstroomse waterstand in hoofd- en nevengeul) is ook dat volgens *Delft3D* de waterspiegel in de hoofdgeul continu en langzaam stijgt. In de tweede simulatie (gedwongen gelijke debietverdeling door manipulatie van de benedenstroomse waterstand in de nevengeul) komt het stroombeeld volgens *Delft3D* goed overeen met het stroombeeld volgens Bulle. Ook de hoogte van de waterspiegel komt goed overeen.

6.2. Vergelijking sedimentbeweging

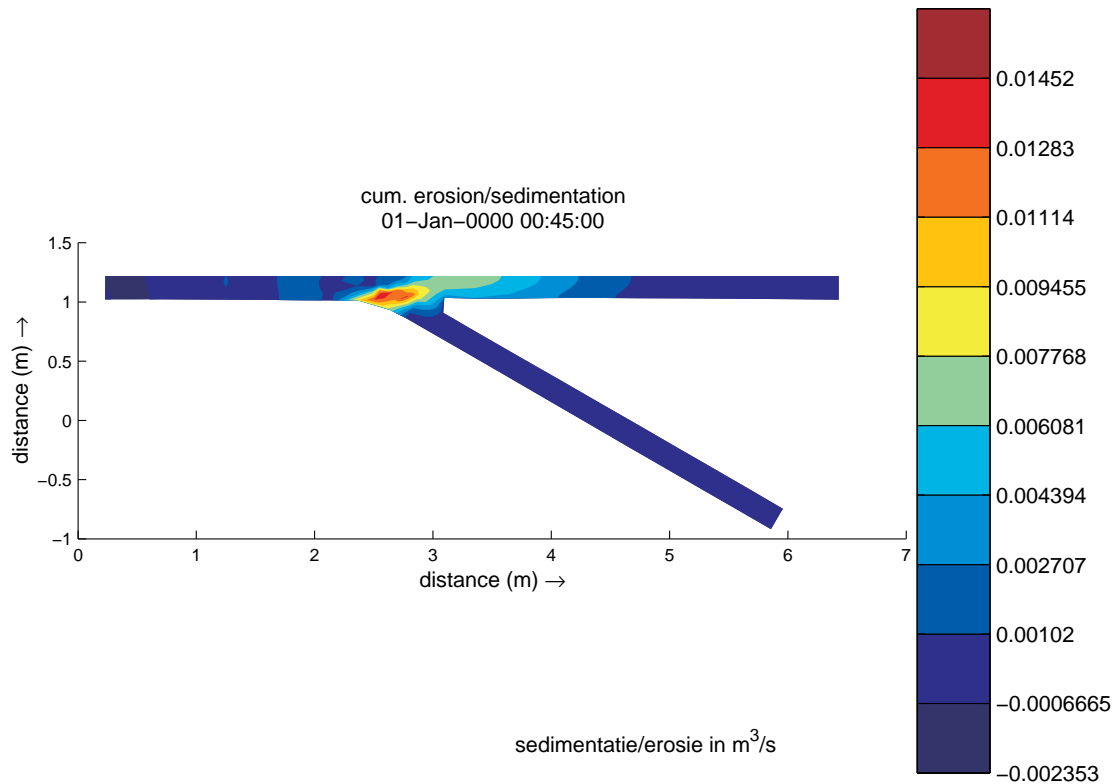
Om de resultaten van Bulle te vergelijken met *Delft3D* zijn er morfologische sommen gemaakt met een 2-D waterbeweging. In deze paragraaf zijn alleen simulaties gemaakt met een gelijke benedenstroomse waterstand. De resultaten van de simulaties zijn vergeleken met foto's die Bulle heeft gemaakt na afloop van de proeven. Belangrijke opmerking hierbij is dat de proefopstelling van Bulle een vaste bodem had. In *Delft3D* is dit ook toegepast.

6.2.1. $\alpha = 30^\circ$

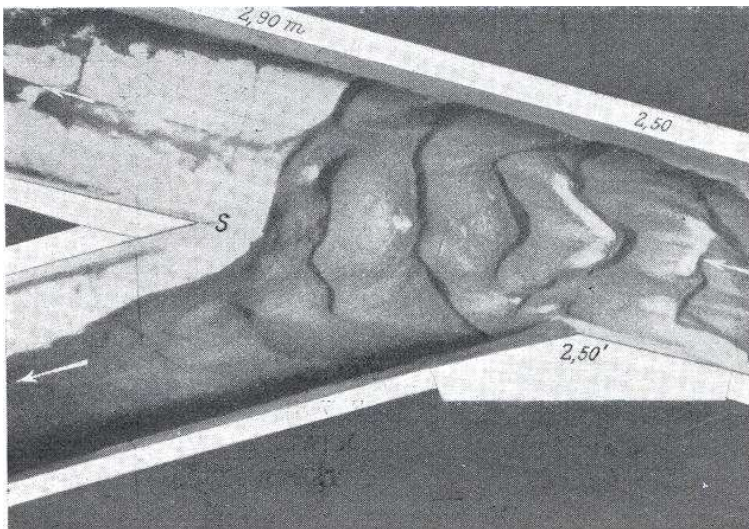
In Tabel 6.5 is een lijst weergegeven met de figuren van de simulaties voor $\alpha = 30^\circ$.

Tabel 6.5: Figuren die de sedimentbeweging beschrijven voor $\alpha = 30^\circ$.

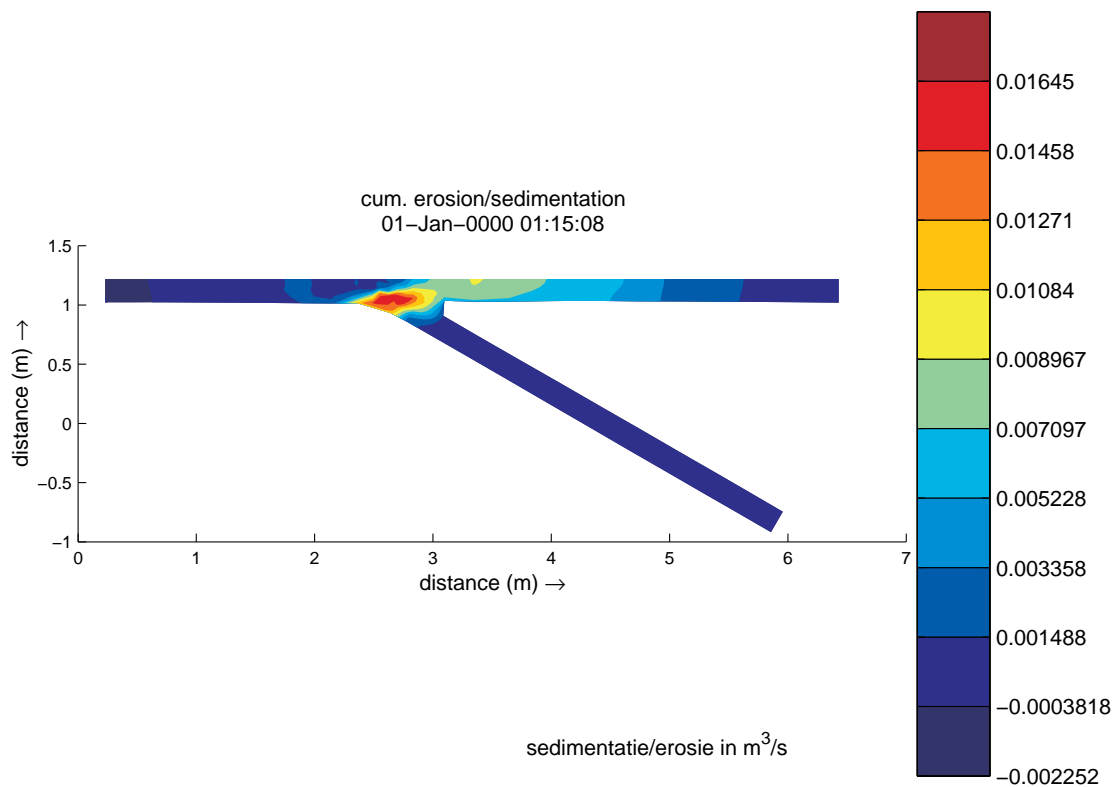
<i>nummer figuur</i>	<i>bron</i>	<i>tijd</i>	<i>doel figuur</i>
6.15	<i>Delft3D</i>	45 min.	sedimentatie-/erosiepatroon
6.16	Bulle	45 min.	
6.17	<i>Delft3D</i>	75 min.	
6.18	Bulle	75 min.	



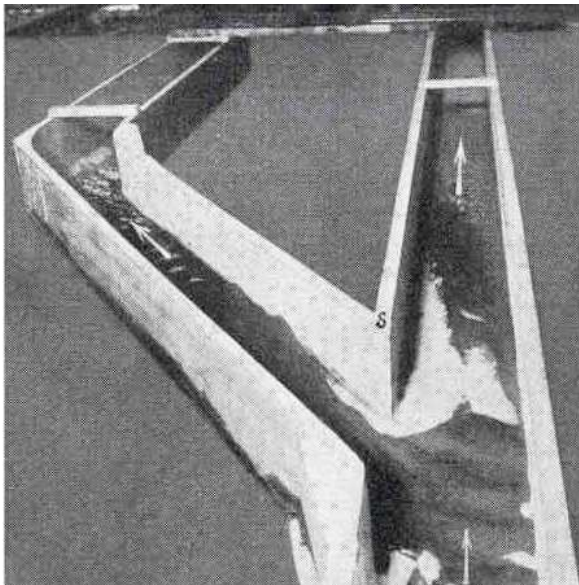
Figuur 6.15: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.



Figuur 6.16: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min. Op de donker gekleurde plaatsen is er sedimentatie, op de lichte plaatsen is de vaste bodem zichtbaar.



Figuur 6.17: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.



Figuur 6.18: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min. Op de donker gekleurde plaatsen is er sedimentatie, op de lichte plaatsen is de vaste bodem zichtbaar.

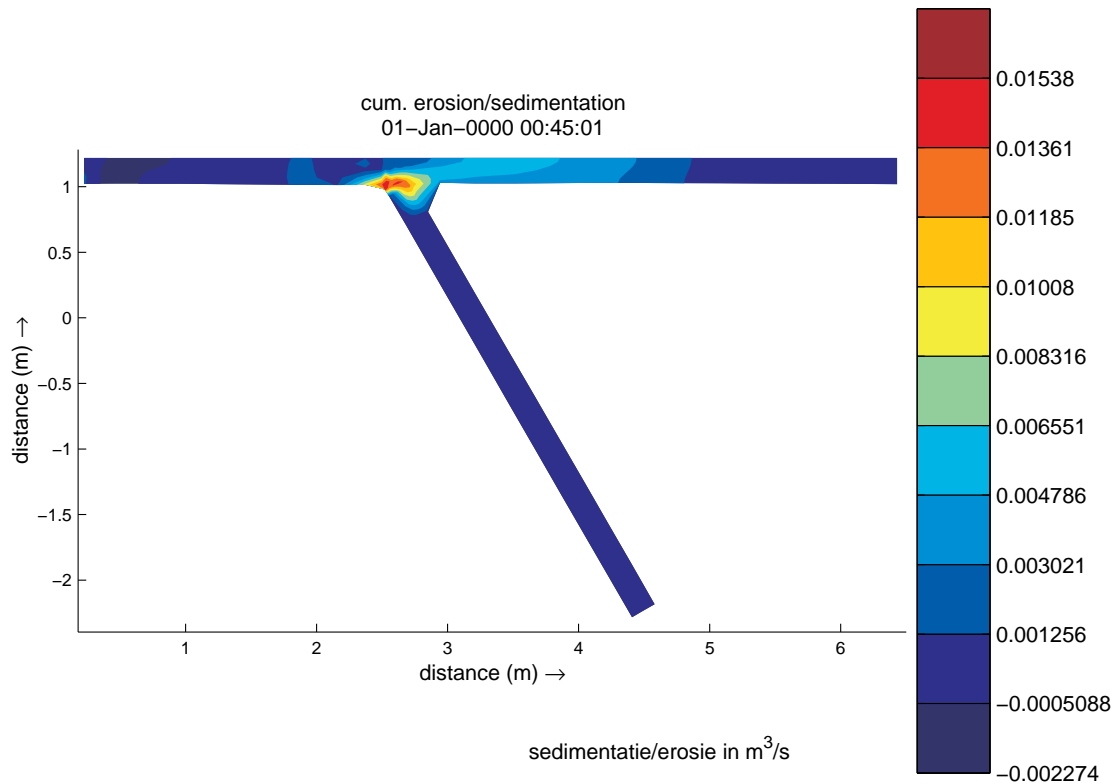
De foto's van Bulle geven weinig informatie. Er zijn geen lijnen van gelijke hoogten aangegeven, zodat alleen de plaats van sedimentatie kan worden aangegeven. Op de foto's van Bulle is te zien dat de sedimentatie zich na 75 min. verder uitspreidt over de bodem. Ook is te zien dat na 45 min. er nog geen sedimentatie heeft plaatsgevonden in de hoofdgeul, na 75 min. is dit wel het geval. De verdere verspreiding van de sedimentatie in benedenstroomse richting in verloop van de tijd is ook waar te nemen in de simulaties met *Delft3D*. Opvallend aan de resultaten van de simulaties is dat er bij de oeverknik in verhouding veel sedimentatie optreedt. Misschien is dit de drempelvorming die Bulle heeft beschreven. Bulle nam namelijk de vorming van een drempel waar aan het begin van de nevengeul.

6.2.2. $\alpha = 60^\circ$

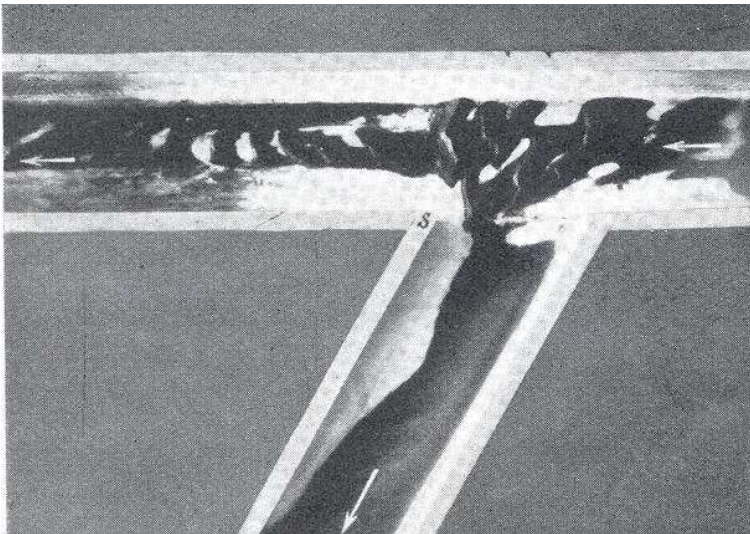
In Tabel 6.6 is een lijst weergegeven met de figuren van de simulaties voor $\alpha = 60^\circ$.

Tabel 6.6: Figuren die de sedimentbeweging beschrijven voor $\alpha = 60^\circ$.

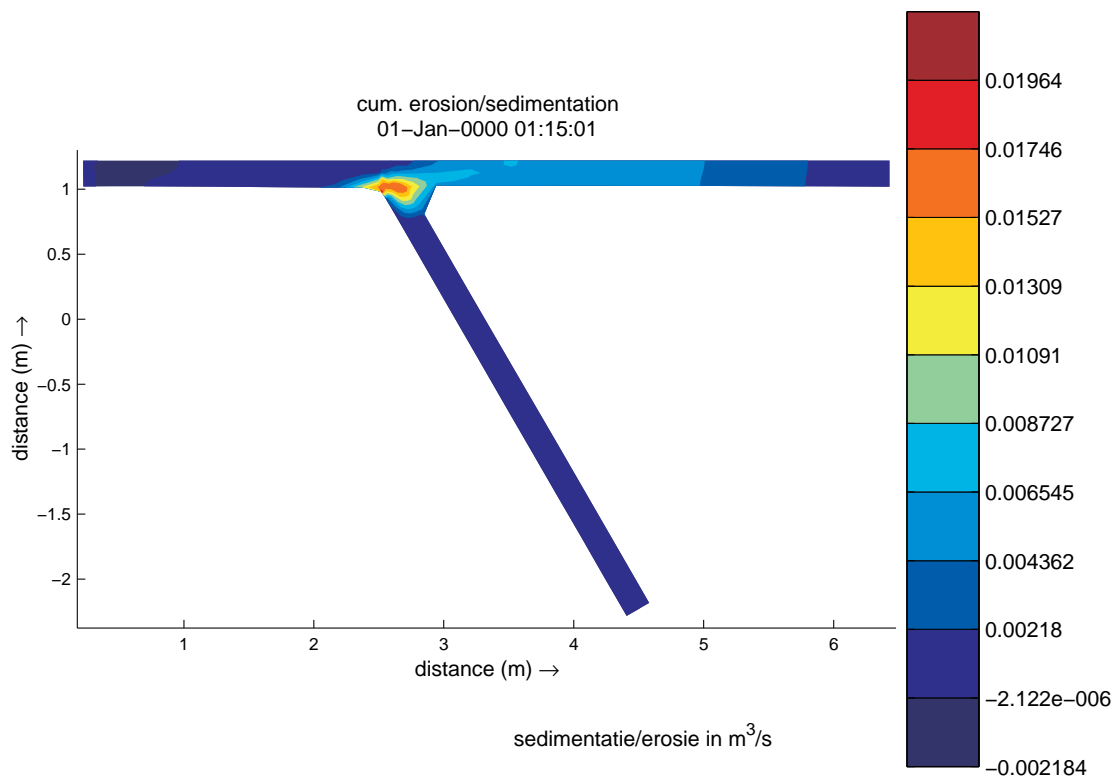
nummer figuur	bron	tijd	doel figuur
6.19	<i>Delft3D</i>	45 min.	sedimentatie-/erosiepatroon
6.20	Bulle	45 min.	
6.21	<i>Delft3D</i>	75 min.	
6.22	Bulle	75 min.	



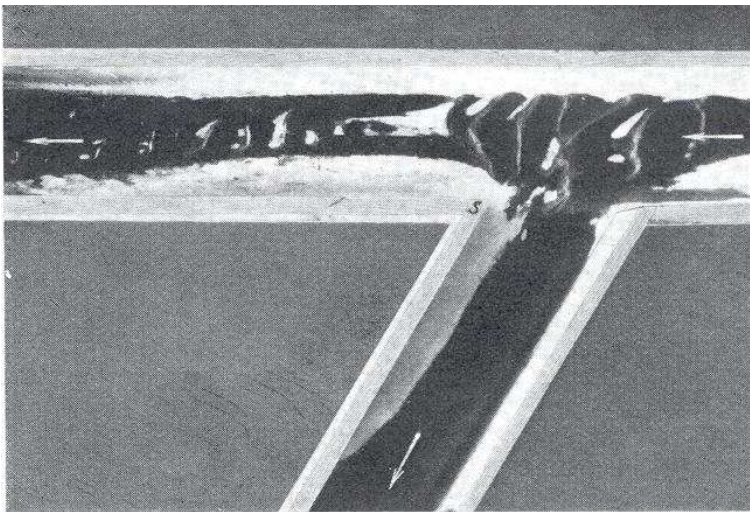
Figuur 6.19: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min.



Figuur 6.20: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 45 min. Op de donker gekleurde plaatsen is er sedimentatie, op de lichte plaatsen is de vaste bodem zichtbaar.



Figuur 6.21: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens *Delft3D* in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 60^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min.



Figuur 6.22: Sedimentatie-/erosiepatroon volgens Bulle in de proefopstelling van Bulle met $\alpha = 30^\circ$ en gelijke benedenstroomse waterstand voor hoofd- en nevengeul na 75 min. Op de donker gekleurde plaatsen is er sedimentatie, op de lichte plaatsen is de vaste bodem zichtbaar.

Voor de simulaties voor $\alpha = 60^\circ$ kan dezelfde vergelijking worden gemaakt als bij 30° . De sedimentatie treedt in de simulaties op dezelfde plaatsen op als op de foto's van Bulle.

6.3. Conclusies vergelijking Bulle en *Delft3D*

Uit de vergelijking van de water- en sedimentbeweging volgens Bulle en volgens *Delft3D* blijkt dat ze allebei nagenoeg dezelfde resultaten geven. Het enige punt waarop ze van elkaar afwijken is de debietverdeling bij gelijke benedenstroomse waterstand in de hoofd- en nevengeul. Het is moeilijk te beoordelen welke bron betrouwbaarder is. De waarnemingen van Bulle zijn niet meer te controleren en de simulaties in *Delft3D* zijn een nabootsing van de werkelijkheid. Vast staat dat met behulp van *Delft3D* aanvullende waarnemingen kunnen worden gedaan voor de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt.

7. DISCUSSIE

Sedimentverdeling is een complex onderwerp. Dit komt op twee manieren tot uiting. Ten eerste is er vrij weinig literatuur beschikbaar over dit onderwerp. Daarnaast handelt deze literatuur vaak over één specifieke laboratoriumsituatie waarin aanbevelingen worden gedaan voor die specifieke situatie of algemene, kwalitatieve aanbevelingen over de invloed van bijvoorbeeld de debietverdeling over de twee geulen benedenstreams van het splitsingspunt en de hoek van afsplitsing van de nevengeul.

Wang *et al.* [1995] hebben een aanzet gegeven voor een meer kwantitatieve beschrijving door de stabiliteit van een splitsingspunt te onderzoeken in relatie tot de debietverdeling en de verhouding van de breedte van de hoofd- en nevengeul. Daarnaast heeft El-Sayed [1995] een splitsingspuntrelatie afgeleid.

Dit hoofdstuk bevat een beschouwing over de verandering/verbetering van de splitsingspuntrelatie die dit afstudeeronderzoek is afgeleid ten opzichte van bestaande splitsingspuntrelaties. Dit wordt behandeld in § 7.1. Vervolgens wordt in § 7.2 het gebruik van *Delft3D* voor het genereren van extra waarnemingen behandeld.

7.1. Splitsingspuntrelaties

In de inleiding in Hoofdstuk 1 is kort aangehaald dat bestaande splitsingspuntrelaties slecht onderbouwd en onnauwkeurig. Het gevolg hiervan is dat het gedrag van het morfologische systeem ten gevolge van de splitsingspuntrelaties gevoelig is. In het vervolg van dit afstudeeronderzoek is de aandacht uitgegaan naar het afleiden van een splitsingspuntrelatie voor de sedimentverdeling en is er niet meer gekeken naar de bestaande relaties. Deze paragraaf bevat een vergelijking van de bestaande relaties met de nieuwe splitsingspuntrelatie. Er zal worden ingegaan op wat de verbetering is ten opzichte van de al bestaande relaties.

In dit afstudeeronderzoek is een relatie afgeleid met de volgende elementen:

- debietverdeling volgens de globale waterbeweging of primaire stroming;
- correctie voor de het optreden van secundaire effecten, zoals de spiraalstroming ten gevolge van het afbuigen van debiet naar de nevengeul. Deze correctie bevat de volgende elementen:
- afname sedimentconcentratie in brongebied voor sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de secundaire stroming;
- verstoringlengte van de sedimentbeweging;
- afwijking van de richting van de sedimentbeweging van de richting van de waterbeweging;
- invloed dwarshelling op de richting van de sedimentbeweging;
- hoeveelheid niet gegenereerde impuls om debiet af te buigen naar de nevengeul, of de invloed van de scheefheid van de debietverdeling;

De relatie die in dit hoofdstuk is opgesteld is weergegeven in Vergelijking (7.1):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)} \cdot e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}} \quad (7.1)$$

De volgende vorm is hier in te herkennen:

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot (1 - \xi) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \sigma}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \xi + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot (1 - \sigma)} \cdot e \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}} \quad (7.2)$$

Hierin is:	ξ	correctiefactor voor de invloed van de secundaire stroming op het sedimenttransport naar de nevengeul	[-]
	σ	correctiefactor voor de invloed van de secundaire stroming op het sedimenttransport naar de hoofdgeul	[-]

In Hoofdstuk 1 is de knooppuntsrelatie van Wang (Wang *et al.* [1995]) aangehaald:

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-k} \quad (7.3)$$

In de handleiding van het 1-D morfologische model *SOBEK* van WL|Delft Hydraulics staan de volgende keuzemogelijkheden om als splitsingspuntrelatie te gebruiken (WL|Delft Hydraulics [1997]):

$$1. \quad S_i = \frac{Q_i}{Q_t} \cdot S_t \quad (7.4)$$

proportioneel aan debietverdeling

$$2. \quad \frac{S_1}{S_2} = \alpha_s \cdot \frac{Q_1}{Q_2} + \beta_s \quad (7.5)$$

lineaire functie van de debietverdeling

$$3. \quad \frac{S_{uit,i}}{S_{uit,j}} = \left(\frac{Q_{uit,i}}{Q_{uit,j}} \right)^n \cdot \left(\frac{B_{s,i}}{B_{s,j}} \right)^m \cdot \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_j} \right) \quad (7.6)$$

sedimentverdeling is een macht van de debietverdeling en breedteverhouding

4. Een tabel waarin voor bepaalde waarden van de debietverdeling $\frac{Q_1}{Q_2}$ de sedimentverdeling

$\frac{S_1}{S_2}$ is gegeven.

Hierin is:	t	index die het totale volume aangeeft dat het splitsingspunt betreedt	[-]
	i, j	nummer van de geul $\in [1, \dots, n]$	[-]
	n	totaal aantal geulen waarin de rivier zich splitst	[-]
	$1, 2$	nummer van de geul benedenstrooms van het splitsingspunt	[-]
α_s		calibratiefactor voor de invloed van de debietverdeling op de sedimentverdeling	[-]
	β_s	calibratiefactor voor de sedimentverdeling	[-]
	m	calibratiefactor voor de invloed van de verhouding van de breedtes op de sedimentverdeling	[-]
	γ	vermenigvuldigingsfactor van de sedimenttransportformule volgens <i>SOBEK</i> -handleiding	[-]

De vierde optie volgens de *SOBEK*-handleiding wordt hier niet verder behandeld. Bij bestudering van de Vergelijkingen (7.3) tot en met (7.6) valt op dat er een direct verband wordt aangenomen tussen de debietverdeling, en dus de primaire waterbeweging, en de sedimentverdeling. Vervolgens wordt er een correctie aangebracht voor de invloed van de secundaire stroming.

Vergelijkingen (7.4) en (7.5) zijn lineair afhankelijk van de debietverdeling en dus van de primaire waterbeweging. Vergelijkingen (7.3) en (7.6) zijn nagenoeg hetzelfde, maar verschillen in de machten. In

Vergelijking (7.3) wordt de macht k bepaald door calibratie. In Vergelijking (7.6) is de macht n gelijk aan het aantal geulen waarin de moedergeul zich splitst en is de macht m een calibratiefactor. Na bestudering van deze vergelijkingen blijken zij een afgeleide te zijn van de debietverdeling met een ongedefinieerde correctie. Dit is inzichtelijk te maken met behulp van Vergelijking (7.8):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{B_1 \cdot m \cdot u_1^n}{B_2 \cdot m \cdot u_2^n} \quad (7.7)$$

$$* u^3 = \left[\frac{Q}{B \cdot h} \cdot C^2 \cdot h \cdot i \right]^3 = \left[\frac{Q}{B} \cdot C^2 \cdot i \right]^3$$

$$\rightarrow \frac{S_1}{S_2} = \frac{B_1 \cdot \left[\frac{Q_1}{B_1} \cdot C^2 \cdot i \right]^{\frac{n}{3}}}{B_2 \cdot \left[\frac{Q_2}{B_2} \cdot C^2 \cdot i \right]^{\frac{n}{3}}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{\frac{n}{3}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1 - \frac{n}{3}} \quad (7.8)$$

Door manipulatie van de calibratiefactoren kan een correctie worden aangebracht voor de invloed van de secundaire stroming. Zo kan in Vergelijking (7.3) door manipulatie van de macht k de invloed van de scheefheid van de debietverdeling worden meegenomen. In Vergelijking (7.6) kan dit eventueel door de macht m te manipuleren. De grootte van deze factoren is echter niet logisch te bepalen. Voor de validatie van de relatie zijn waarnemingen nodig van de specifieke situatie.

In dit afstudeeronderzoek is een poging gedaan de correctie voor het sedimenttransport door de secundaire stroming inzichtelijk te maken. Op die manier kan de sedimentverdeling bepaald worden zonder dat er eerst waarnemingen nodig zijn voor de validatie van de knooppuntsrelatie. Op zich is dit aardig gelukt, omdat de berekeningen in Hoofdstuk 5 goed overeenkomen met de waarnemingen. Nadeel van de nieuwe relatie is echter wel dat deze een stuk ingewikkelder is en waarschijnlijk op het eerste oog niet te doorgronden.

7.2. Delft3D

Bij de vergelijking van de waarnemingen van Bulle met de waarnemingen in *Delft3D*, kwam naar voren dat bij eenzelfde proefopstelling niet dezelfde debietverdeling plaatsvond. Enkel door manipulatie van de benedenstroomse waterstand in de nevengeul kan in *Delft3D* dezelfde debietverdeling worden bereikt. Opvallend hierbij is dat het stroombeeld van de simulatie met de gelijke debietverdeling beter overeen komt met het stroombeeld volgens Bulle dan in het geval met gelijke benedenstroomse waterstanden.

Volgens Bulle is de hoogte van de stuwen aan het einde van de hoofd- en nevengeul nagenoeg gelijk gehouden gedurende alle proeven ("Am unteren Ende der beiden Arme befanden sich die Stauwehre t_g und t_s , deren Kronen bei den meisten Versuchen in genau gleicher Höhe lagen.", Bulle [1926], p. 1). Misschien moet dit toch ruimer worden geïnterpreteerd.

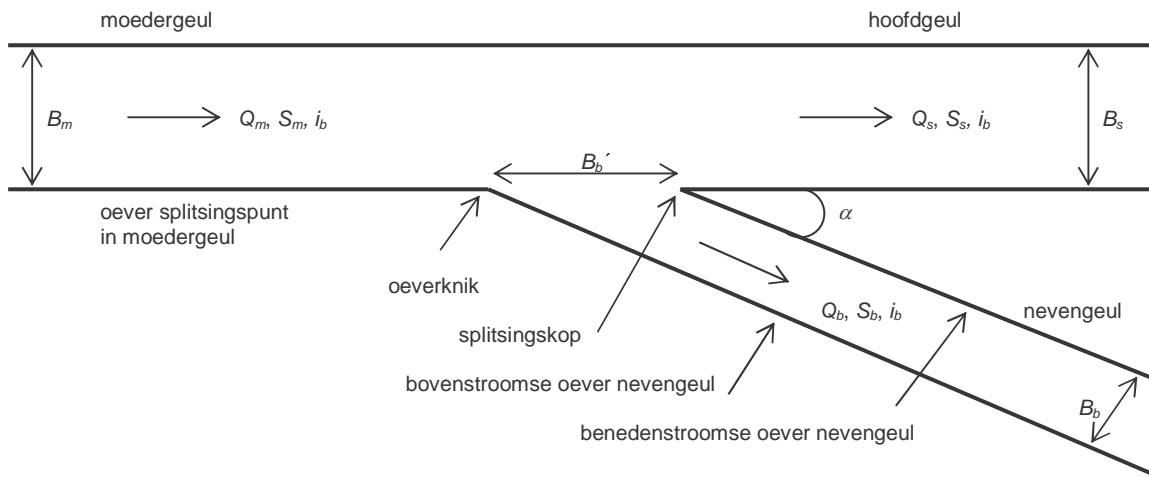
Nu is gebleken dat *Delft3D* geschikt is de situatie bij een splitsingspunt na te bootsen, is er een vrij gemakkelijke manier binnen handbereik om door middel van simulaties extra waarnemingen te genereren. De bestaande waarnemingen hebben debietverdelingen waarbij het debiet in de hoofd- en nevengeul van dezelfde orde van grootte zijn. Voor toepassing van de splitsingspuntrelatie voor het bepalen van het

sedimenttransport naar een nevengeul op kleine schaal zouden vooral simulaties nodig zijn waarbij $\frac{Q_s}{Q_b} \approx$

20.

8. CONCLUSIES

De conclusies zijn opgedeeld in de conclusies uit de theorievorming (§ 8.1), conclusies uit de validatie van de opgestelde relatie (§ 8.2) en conclusies uit de vergelijking van de literatuur, eigen interpretatie en *Delft3D* (§ 8.3). In Fig. 8.1 is een definitieschets weergegeven met de naamgeving bij een splitsingspunt.



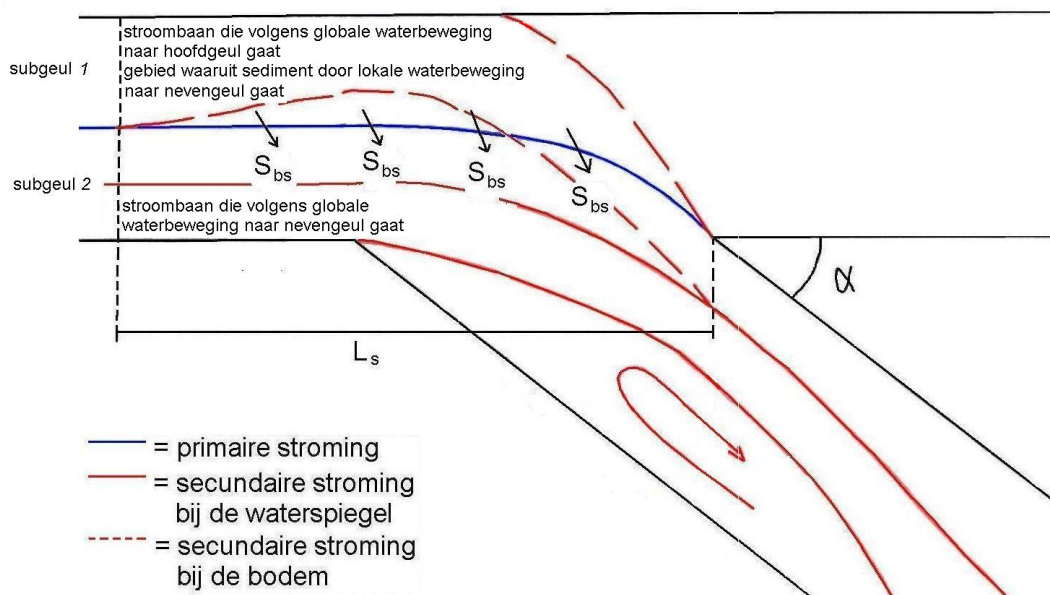
Figuur 8.1: Naamgeving bij een splitsingspunt.

8.1. Conclusies uit theorievorming

De conclusies in deze paragraaf slaan op Doelstelling 1., het afleiden uit 2-D riviermorfologie van een algemeen toepasbare 1-D splitsingspuntrelatie voor de verdeling van sediment over de riviertakken bij een riviersplissing, en *Doelstelling 2a.*, het krijgen van fysisch inzicht (verband tussen geometrische en fysische grootheden). De theorievorming staat beschreven in Hoofdstuk 2 en 3.

1. De stroming ter plaatse van een splitsingspunt kan worden onderscheiden in een globale en een lokale waterbeweging;
2. De globale waterbeweging, of primaire stroming, beschrijft de debietverdeling over de hoofd- en nevengeul aan de hand van de evenwichtsdebieten van de hoofd- en nevengeul. De primaire stroming is hierbij gedefinieerd als de driedimensionale stroming met dezelfde dieptegemiddelde stroomsnelheidsvectoren als de werkelijke stroming, maar de horizontale stroomsnelheden zijn overal volgens gelijkvormige profielen met uniforme stroomrichting over de diepte verdeeld. Voor de bepaling hiervan moet het stroombeeld bovenstrooms van het splitsingspunt in beschouwing worden genomen. Deze wordt verdeeld in een stroombaan die naar de hoofdgeul gaat en een stroombaan die naar de nevengeul gaat. Het sediment dat wordt getransporteerd in de stroombaan die naar de nevengeul gaat, is het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de primaire stroming, zie Fig. 8.2;
3. Het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de primaire stroming kan worden beschreven met het twee-geulenmodel van Struiksma [1983] en De Vriend *et al.* [2001]. Dit transport is afhankelijk van de afstand van een verstoring, bijvoorbeeld het begin van een bocht, in de moedergeul tot de plaats waar de nevengeul afsplitst;
4. De lokale waterbeweging beschrijft het sedimenttransport van de stroombaan die volgens de primaire stroming naar de hoofdgeul gaat naar de stroombaan die volgens de primaire stroming naar de nevengeul gaat, zie Fig. 8.2;
5. De grootte van het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging is afhankelijk van:

- a. het sedimenttransport per eenheid van breedte in de stroombaan die volgens de primaire stroming naar de hoofdgeul gaat;
 - b. de verstoringlengte van de sedimentbeweging. Dit is de lengte waarover de stroming in bovenstroomse richting wordt verstoord door het splitsingspunt, zie Fig. 8.2;
 - c. de richting van het sedimenttransport ter plaatse van het splitsingspunt. Hierin is de invloed van de kromming van de waterbeweging en de invloed van de dwarshelling verwerkt. De richting van het sedimenttransport is een gevolg van de secundaire stroming. Secundaire stroming is de afwijking van de werkelijke stroming van de primaire stroming. Door afbuiging van een deel van het debiet uit de moedergeul naar de nevengeul wordt dit deel van de stroming een kromming opgelegd en beschrijft het een spiraalstroming;
 - d. de afmetingen van de neer. Aan de bovenstroomse oever van de nevengeul vormt zich een neer ten gevolge van de traagheid van de stroming. De afmetingen van de neer zijn een maat voor de hoeveelheid niet gegenereerde impuls om debiet naar de nevengeul af te buigen, of de invloed van de scheefheid van de debietverdeling. De grootte van de neer is afhankelijk van het debiet in de moedergeul en de hoek van afsplitsing;
 - e. de sedimentverdeling over de diepte. Als het sediment voornamelijk door middel van bodemtransport wordt getransporteerd, is de sedimentverdeling over de diepte niet van belang.
6. Indien de moedergeul recht is en de hoofdgeul gekromd, kan er op dezelfde manier als voor het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de lokale waterbeweging een correctie worden aangebracht voor het sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van de lokale waterbeweging.



Figuur 8.2: Sedimentverdeling volgens globale en lokale waterbeweging.

8.2. Conclusies uit validatie

De conclusies in deze paragraaf slaan op Doelstelling 2b., het doen van kwantitatieve voorspellingen, en Doelstelling 2b., het gebruiken van de relatie voor rapid assessment. Beide doelstellingen hebben betrekking op het gebruik van de splitsingspuntrelatie als ontwerpgereedschap.

7. De sedimentverdeling bij riviersplitsingen kan worden beschreven met behulp van Vergelijking (8.1):

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{S_{sp} - S_{bs} + S_{ss}}{S_{bp} + S_{bs} - S_{ss}} \cdot c \quad (8.1)$$

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,18}{B_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b)\right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s\right) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{0,18}{B_2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_s)\right] \cdot \sin(\gamma_s) \cdot L_s\right)} \cdot e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}} \quad (8.2)$$

Hierin is:	S	sedimenttransport	[m ³ /s]
	s	eigenschap van de hoofdgeul (straight channel)	
	b	eigenschap van de nevengeul (branched channel)	
	Q	debiet	[m ³ /s]
	e	evenwichtswaarde behorende bij geometrie geul	
	B	breedte geul	[m]
	1	eigenschap van subgeul 1	
	2	eigenschap van subgeul 2	
	γ	hoek tussen de waterbeweging en de sedimentbeweging ten gevolge van kromming van de waterbeweging en dwarshelling van de bodem	[°/rad]
	L_s	verstoringlengte waterbeweging in bovenstroomse richting ten gevolge van het splitsingspunt	[m]
	e	calibratiefactor voor coëfficiënt c die de invloed van de niet gegenereerde impuls weergeeft	[-]
	f	calibratiefactor die de invloed van de debietverdeling in de macht van coëfficiënt c weergeeft	[-]

In Vergelijking (8.2) is de volgende vorm te herkennen:

$$\frac{S_s}{S_b} = \frac{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot (1 - \xi) + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot \sigma}{Q_{se}^{\frac{5}{3}} \cdot B_1^{\frac{2}{3}} \cdot \xi + Q_{be}^{\frac{5}{3}} \cdot B_2^{\frac{2}{3}} \cdot (1 - \sigma)} \cdot e \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}} \quad (8.3)$$

Hierin is:	ξ	correctiefactor voor de invloed van de secundaire stroming op het sedimenttransport naar de nevengeul	[-]
	σ	correctiefactor voor de invloed van de secundaire stroming op het sedimenttransport naar de hoofdgeul	[-]

8. De grootte van de calibratiefactoren e en f zijn bepaald voor de volgende situaties:
- Rechte moedergeul, rechte hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$; $f = 1$;
 - Rechte moedergeul, afbuigende hoofdgeul en afbuigende nevengeul: $e = 0,2$ en
 - $\frac{B_b}{B_s} = 0,67$: $f = 1$;
 - $\frac{B_b}{B_s} = 0,25$: $f = 2$.
9. Een vorm van de correctiefactor voor de grootte van de hoek van afsplitsing α was niet te bepalen;
10. De beschikbare waarnemingen uit de literatuur zijn in aantal zeer klein. Daarnaast zijn er alleen waarnemingen beschikbaar waarbij er door de hoofd- en de nevengeul dezelfde orde van grootte van het debiet stroomt, zodat $\frac{Q_s}{Q_b} \in [0;5]$;
11. Aan doelstelling 2b. het gebruiken van de relatie voor rapid assessment is niet voldaan, omdat Vergelijking (8.1) ingewikkeld is.

8.3. Conclusies uit kwalitatieve vergelijking Bulle en Delft3D

De conclusies in deze paragraaf slaan op Doelstelling 3., het vergelijken van de water- en sedimentbeweging volgens de literatuur en volgens *Delft3D* om te bepalen of *Delft3D* geschikt is om de situatie bij een splitsingspunt na te bootsen.

12. *Delft3D* bootst de water- en sedimentbeweging bij een splitsingspunt goed na. Dit betekent dat door middel van simulaties in *Delft3D* extra waarnemingen kunnen worden gegenereerd.

9. AANBEVELINGEN

Naar aanleiding van de resultaten van dit afstudeeronderzoek kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

1. De opgestelde relatie volgens Vergelijking (8.1) is ingewikkeld. Onderzoek naar vereenvoudiging van de relatie is aan te bevelen. Aandacht zou hierbij uit moeten gaan naar de invloed van de dwarshelling, in de parameters γ_b en γ_s . Deze invloed is waarschijnlijk klein;
2. Tijdens de literatuurstudie en de validatie met behulp van waarnemingen zijn situaties geanalyseerd waarbij de breedte van en het debiet in de nevengeul van dezelfde orde van grootte zijn als van de hoofdgeul. Om de toepasbaarheid van de splitsingspuntrelatie te kunnen bepalen is onderzoek noodzakelijk naar de afsplitsing van een nevengeul, waarvan de breedte en het debiet een orde van grootte kleiner zijn dan de breedte van en het debiet in de hoofdgeul. Verschil met een splitsingspunt op grote schaal is in zo'n geval waarschijnlijk dat niet meer de gehele breedte van de moedergeul ter plaatse van het splitsingspunt wordt beïnvloed door de spiraalstroming;
3. Met behulp van *Delft3D* zou meer onderzoek kunnen worden gedaan. De aandacht zou hierbij uit moeten gaan naar de volgende zaken:
 - a. kwalitatief onderzoek naar het stroombeeld indien het debiet in en de geometrie van de hoofdgeul een orde van grootte groter zijn dan van nevengeul;
 - b. kwantitatief onderzoek naar de invloed van de parameters, zoals genoemd in Conclusie 5. Tabel 9.1 bevat een schema met het doel van bepaalde simulaties.

Tabel 9.1: Doel simulaties voor kwantitatief onderzoek in *Delft3D*.

variërende parameter	niet-verdienende parameter	beoogd resultaat
α	Q_m $\frac{B_2}{B_1}$ $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ C afronding oeverknik = 0	$S_{bs} = f(\sin \alpha)$
Q_m	α $\frac{B_2}{B_1}$ $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ C afronding oeverknik	afmetingen neer = $f(Q_m)$
α en Q_m	$\frac{B_2}{B_1}$ $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ C afronding oeverknik	afmetingen neer = $f(\alpha, Q_m)$
$\frac{B_2}{B_1}$	α Q_m $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ C afronding oeverknik	afmetingen neer = $f\left(\frac{B_2}{B_1}\right)$
$\frac{\partial z_b}{\partial y}$	α Q_m $\frac{B_2}{B_1}$ C afronding oeverknik	$S_{bs} = f\left(\frac{\partial z_b}{\partial y}\right)$ en term (α) >> term ($\frac{\partial z_b}{\partial y}$)
C	α Q_m $\frac{B_2}{B_1}$ $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ afronding oeverknik	$S_{bs} = f(\ln(C))$
afgeronde oeverknik	α Q_m $\frac{B_2}{B_1}$ $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ C	$S_s = f(\text{afronding oeverknik})$ en neemt toe als $R \gg$

BRONNEN

Literatuur

- Akkerman, G.J. (1993), *Zandverdeling bij splitsingspunten, literatuurinventarisatie voor inlaten en nevengeulen*, report Q1573. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Battjes, J.A. (1999), *Vloeistofmechanica*, collegedictaat Ctme2100. Technische Universiteit Delft, Delft.
- Bulle, H. (1926), *Untersuchungen über die Geschiebeableitung bei der Spaltung von Wasserläufen*. VDI-Verlag, Berlijn.
- Crosato, A. (1990), *Simulation of meandering river processes*, Communications on hydraulic and geotechnical engineering, report no. 90-3. Delft University of Technology, Delft.
- Den Dekker, P. en J.M. van Voorthuizen (1994), *Research on the morphological behaviour of bifurcations in rivers*, MSc thesis. Delft University of Technology, Delft.
- De Vriend, H.J. en N. Struiksma (1983), *Flow and bed deformation in river bends*. Proc. of the conference River Meandering, p. 810-828, edited by C.M. Elliott. ASCE, New Orleans.
- De Vriend, H.J. (1999), *Rivierwaterbouwkunde*, collegedictaat Ctwa3340. Technische Universiteit Delft, Delft.
- De Vriend, H.J., Z.B. Wang en H. Havinga (2001), *River Dynamics*, collegedictaat Ct5311. Technische Universiteit Delft, Delft.
- De Vries, M. en J.F. van de Werff (1969), *Splitsingspunt Westervoort, stroombeelden en zandverdeling*, report M395. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- El-Sayed, S.M. (1995), *Sediment distribution at bifurcations, case of dividing wall*, MSc. Thesis. IHE, Delft.
- Engelund, F. en E. Hansen (1967), *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Kopenhagen
- Habermaas, F. (1935), *Geschiebeeinwanderung in Werkkanäle und deren Verhinderung*. Wasserkraft und Wirtschaft, vol. 30, no. 9, p. 97-103.
- Jansen, P.Ph. (ed.) (1979), *Principles of river engineering, the non-tidal alluvial river*. Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft.
- Koch, F.G. en C. Flokstra (1980), *Bed level computations for curved alluvial channels*. Proc. of the XIXth IAHR congress, vol. 2, p. 357, New Delhi.
- Meijer, D.G. en L. Ksiazek (1994), *Sediment distribution in a channel bifurcation, FLUENT simulations*, report Q1941. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Mosselman, E. (2001), *Morphological development of side channels*, CFR project report 9. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Riad, K. (1961), *Analytical and experimental study of bed load distribution at alluvial diversions*, dissertation at Delft University of Technology. Waltman, Delft.

- Roosjen, R. en C. Zwanenburg (1995), *Research on bifurcations in rivers*, MSc thesis. Delft University of Technology, Delft.
- Shafai-Bajestan, M. (1999), *Transport of sediment into a channel branch in a river bend*. IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, september 1999, p. 279-287, Genova.
- Silva, W., F. Klijn en J. Dijkman (2000), *Ruimte voor de Rijntakken, wat het onderzoek ons heeft geleerd*. Rijkswaterstaat, directie Oost-Nederland.
- Struiksma, N. (1983), *Point bar initiation in bends of alluvial rivers with dominant bed load transport*, report R657-XVII W308 part III. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Struiksma, N., K.W. Olesen, C. Flokstra en H.J. de Vriend (1985), *Bed deformation in curved alluvial channels*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, vol. 23, no. 1, p. 57-79.
- Struiksma, N. en A. Crosato (1989), *Analysis of a 2-D bed topography model for rivers*, in River Meandering, S. Ikeda en G. Parker (Eds), Water Resources Monograph, p. 153-180.
- Zwaard, J.J. van der (1981), *Splitsingspunt Pannerdense Kop, verdeling van het sedimenttransport bij het splitsingspunt*, report M932. WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Wang, Z.B., R.J. Fokkink, M. de Vries en A. Langerak (1995), *Stability of river bifurcations in 1D morphodynamic models*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, vol. 33, no. 6, p. 739-750.
- WL|Delft Hydraulics (1997), *Technical reference manual, morphology and sediment transport*, SOBEK version 1.18. WL|Delft Hydraulics, Delft.

Websites

www.rijn-on-line

www.terradesk.nl

A. EXPERIMENTEN HABERMAAS

In deze bijlage zullen de experimenten van Habermaas [1935] worden behandeld. Kenmerken van de proefopstelling zijn:

- breedte geulen = 0,20 m;
- helling oever is 1 : 1,5;
- vaste bodem;
- ruwheidscoëfficiënt volgens Nikuradse = 0,15 m.

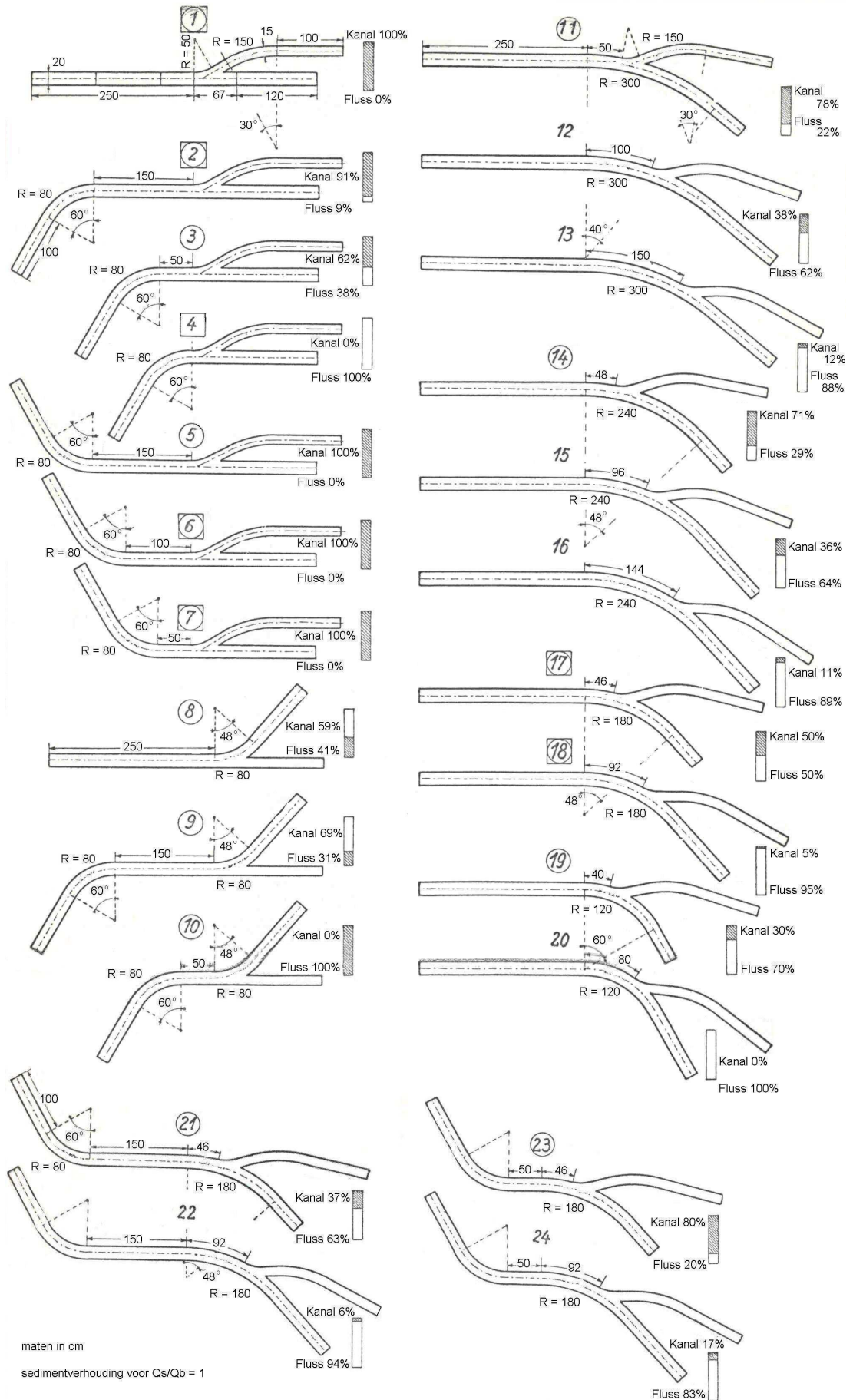
Tijdens de experimenten werden de volgende fysische parameters gevarieerd:

- debiet in de moedergeul Q_m ;
- waterdiepte h ;
- hoeveelheid toegevoegde sediment aan het begin van de moedergeul S_m . Deze werd aangepast aan het evenwichtstransport behorende bij het debiet in de moedergeul Q_m .

Tijdens de experimenten werden de volgende geometrische parameters gevarieerd:

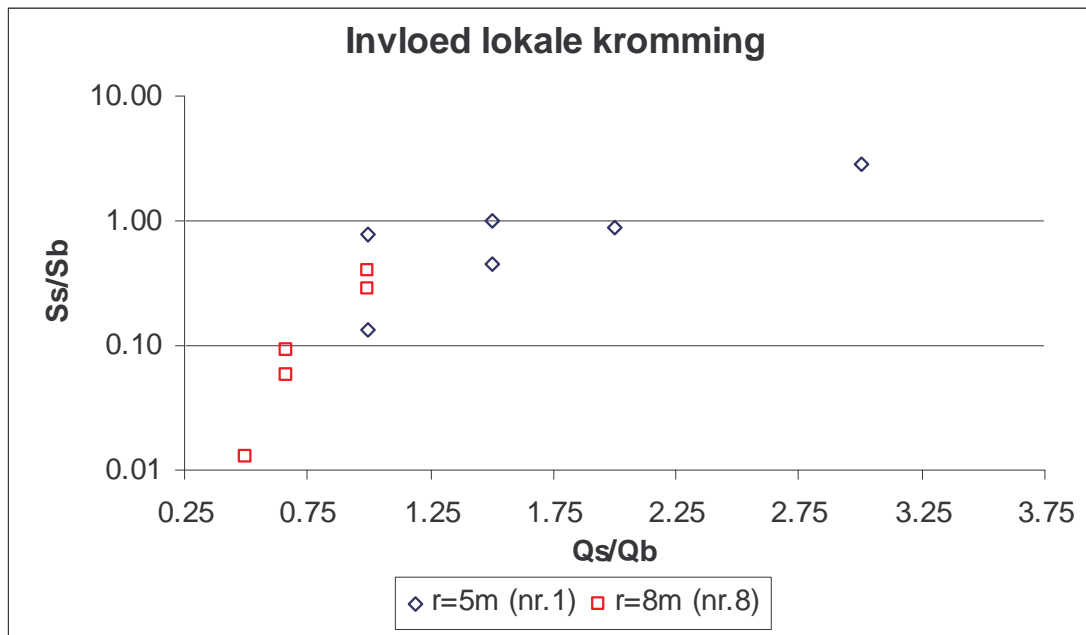
- hoek van afsplitsing α (lokale kromming);
- kromming moedergeul en hoofdgeul (globale kromming);
- afstand tussen einde globale kromming en afsplitsing nevengeul;
- afstand tussen begin globale kromming en afsplitsing nevengeul;
- zijde van de globale kromming waarvan de nevengeul zich afsplitst (binnen- of buitenkant kromming).

Voor de verschillende proefopstellingen, zie Fig. A.1.



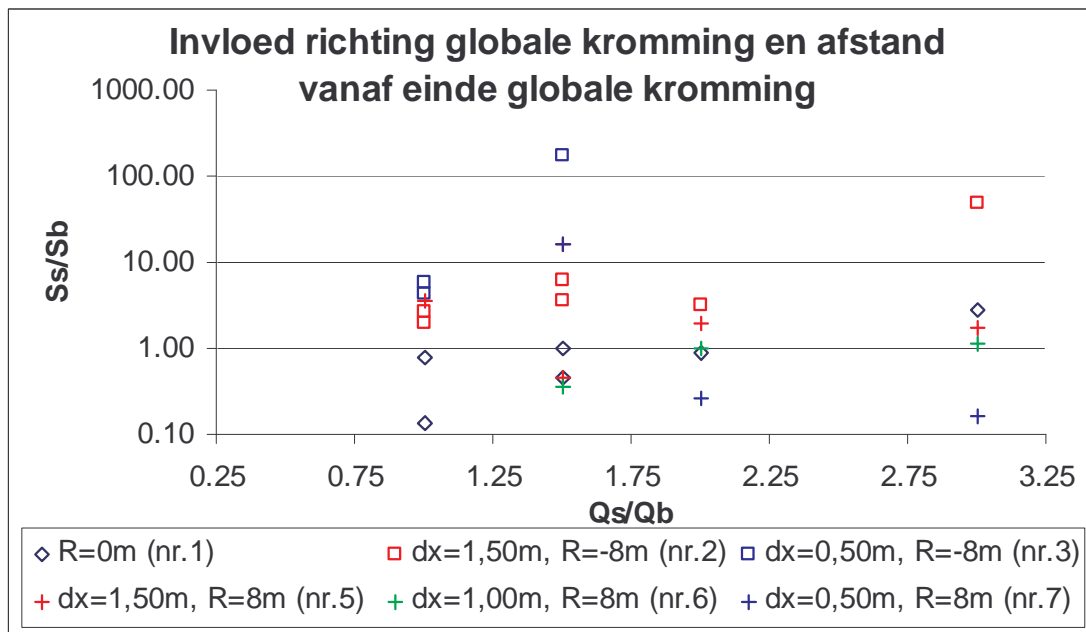
Figuur A.1: Proefopstellingen experimenten Habermas (Habermas [1935]).

In Fig. A.2 tot en met A.6 zijn de resultaten van de experimenten uitgezet.



r = straal lokale kromming

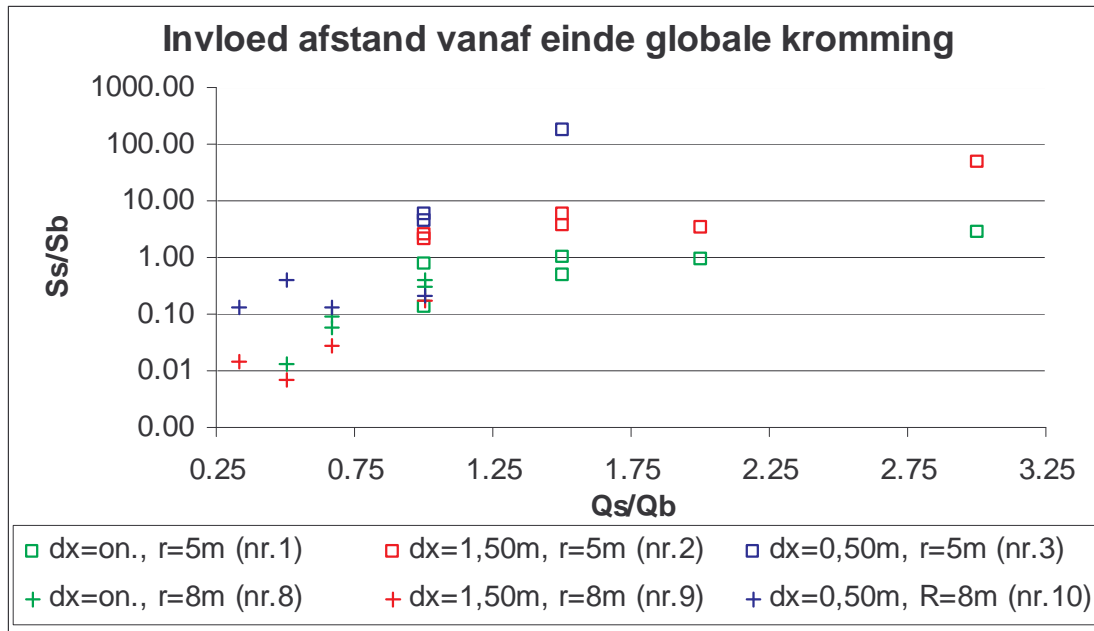
Figuur A.2: Invloed lokale kromming.



R = straal globale kromming

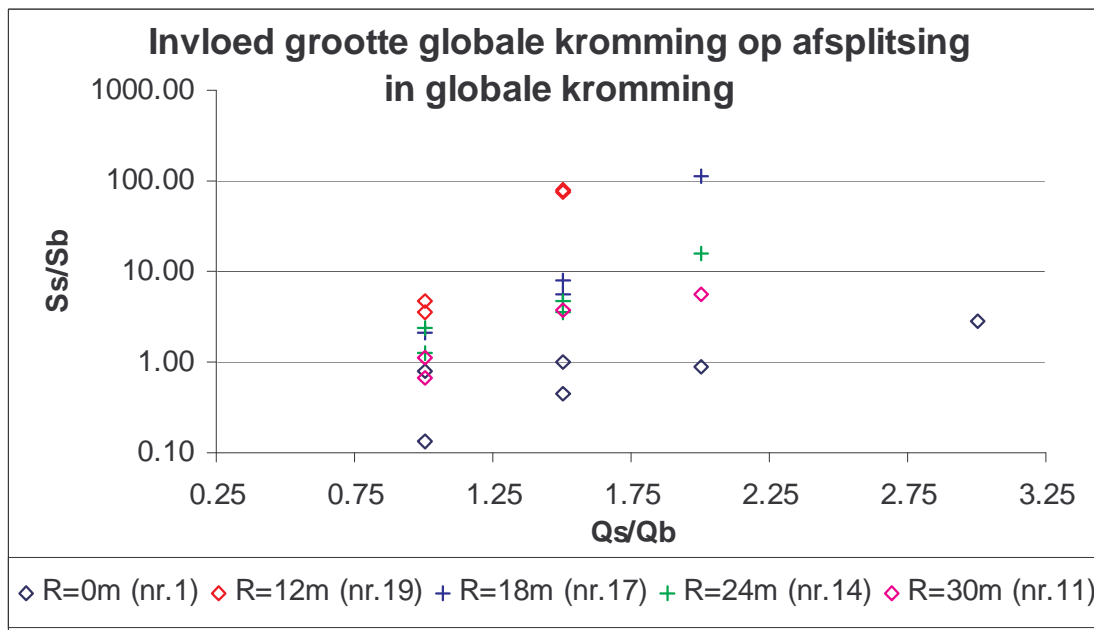
dx = afstand vanaf einde globale kromming

Figuur A.3: Invloed globale kromming en afstand vanaf einde globale kromming. In proefopstelling 4 ontvangt de nevengeul bij alle stromingsregimes geen sediment.



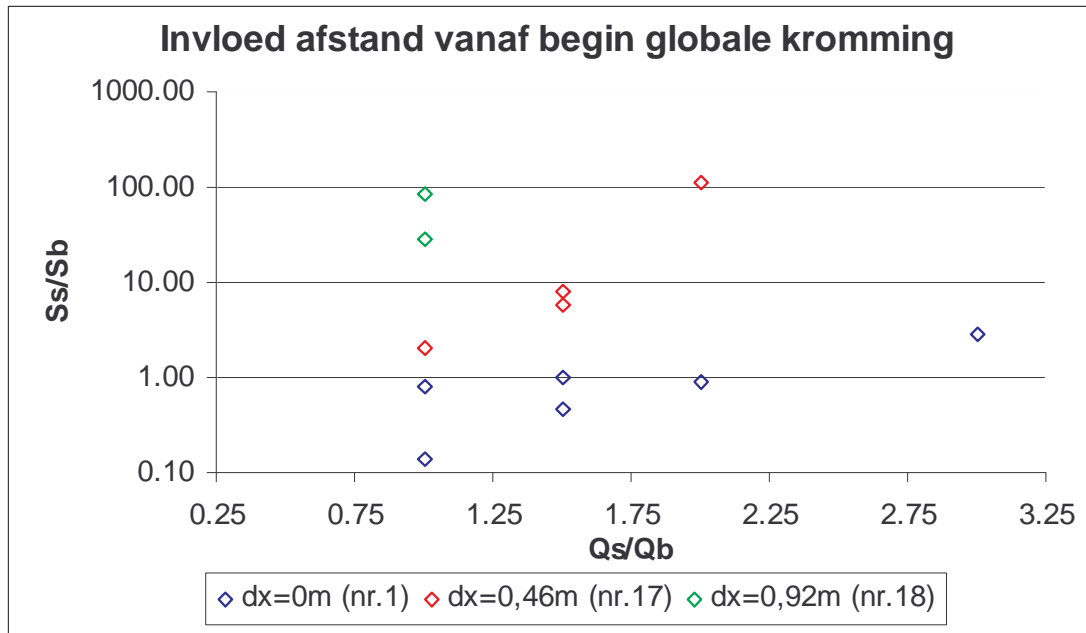
r = straal lokale kromming
 dx = afstand vanaf einde globale kromming

Figuur A.4: Invloed lokale kromming en afstand vanaf einde globale kromming. In proefopstelling 4 ontvangt de nevengeul bij alle stromingsregimes geen sediment.



R = straal globale kromming

Figuur A.5: Invloed grootte globale kromming op afsplitsing in globale kromming.



dx = afstand vanaf begin kromming

Figuur A.6: Invloed afstand vanaf begin globale kromming.

Uit deze figuren kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

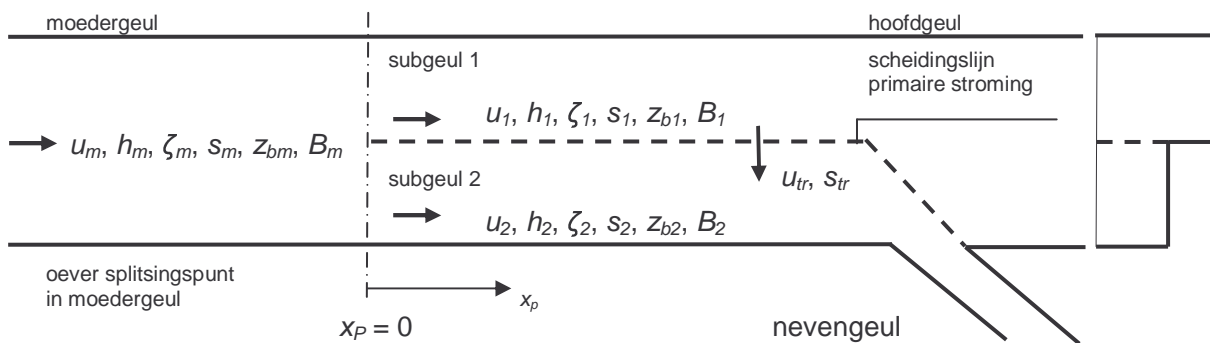
- een grotere verhouding $\frac{Q_s}{Q_b}$ leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.2 tot en met A.6);
- een sterkere lokale kromming geeft een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.2, A.4);
- afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.3, A.4);
- een grotere afstand vanaf het einde van de globale kromming leidt tot een kleinere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.3, A.4);
- een sterkere globale kromming met afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.5);
- een grotere afstand vanaf het begin van de globale kromming met afsplitsing aan de buitenzijde van de globale kromming leidt tot een grotere verhouding $\frac{S_s}{S_b}$ (Fig. A.6).

B. AFLEIDING GLOBALE WATER- EN SEDIMENTBEWEGING

De hoeveelheid sediment in de stroombaan die naar de nevengeul gaat kan worden uitgedrukt met Vergelijking (B.1):

$$S_{bp} = f(\text{vorm dwarsdoorsnede, debietverdeling over de breedte, sedimentverdeling over de breedte}) \quad (\text{B.1})$$

De globale waterbeweging wordt gedomineerd door de zwaartekracht en wrijving en kan worden beschreven met het model van Struiksma *et al.* [1985] en Struiksma & Crosato [1989] uit § 3.1.3. Een eenvoudiger soortgelijk model is het twee-geulenmodel van Struiksma [1983] en De Vriend *et al.* [2001]. In dit model wordt een geul opgedeeld in twee subgeulen. Voor elke subgeul kunnen de 1-D continuïteits- en impulsvergelijking worden opgesteld. In het model van Struiksma en De Vriend *et al.* is dat in hun model de breedtes van Subgeul 1 B_1 en Subgeul 2 B_2 gelijk zijn aan $\frac{1}{2} \cdot B_m$. In deze afleiding kunnen de breedtes van de subgeulen variëren. De subgeulen kunnen water en sediment uitwisselen, zie Fig. B.1:



Figuur B.1: Definitie twee-geulenmodel met de karakteristieke parameters per geul (naar Struiksma [1983] en De Vriend [2001]).

Hierin is:	1	eigenschap van Subgeul 1	
	2	eigenschap van Subgeul 2	
	ζ	hoogte waterspiegel	[m]
	u_{tr}	uitwisseling van snelheid tussen de twee subgeulen	[m/s]
	s_{tr}	uitwisseling van sediment tussen de twee subgeulen	[m ² /s]
	x_p	afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van van de globale verstoring	[m]

In het vervolg van deze bijlage wordt met de hoofdgeul bedoeld de subgeul die de primaire stroming bevat die naar de hoofdgeul gaat (in Fig. B.1 Subgeul 1, *boven* de stippellijn). Met de nevengeul wordt bedoeld de subgeul die de primaire stroming bevat die naar de nevengeul gaat (in Fig. B.1 Subgeul 2, *onder* de stippellijn).

De vergelijkingen voor de hoofd- en nevengeul zijn als volgt:

hoofdgeul

$$u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\frac{q_{tr}}{B_1} \quad (\text{B.2})$$

$$u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} = -g \cdot \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} \quad (\text{B.4})$$

nevengeul

$$u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{q_{tr}}{B_2} \quad (\text{B.3})$$

$$u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = -g \cdot \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2} \quad (\text{B.5})$$

continuïteit

beweging

Voor de afleiding worden een aantal parameters gedefinieerd en aannames gedaan:

$$U = u_1 - u_2$$

$$\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$$

$$H = h_1 - h_2$$

$$B_m \cdot \bar{u} = B_1 \cdot u_1 + B_2 \cdot u_2 \quad \leftrightarrow \quad \bar{u} = \frac{B_1 \cdot u_1 + B_2 \cdot u_2}{B_m} \quad B_m = B_1 + B_2$$

$$\leftrightarrow \quad \bar{u} = \frac{B_1}{B_m} \cdot u_1 + \frac{B_m - B_1}{B_m} \cdot u_2 \quad \theta = \frac{B_1}{B_m}$$

$$\leftrightarrow \quad \bar{u} = \theta \cdot u_1 + (1 - \theta) \cdot u_2$$

$$\bar{u} = \theta \cdot u_1 + (1 - \theta) \cdot u_2$$

$$U = u_1 - u_2$$

$$\begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 1 - \theta \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline \theta \\ \hline \end{array}$$

$$\bar{u} = \theta \cdot u_1 + (1 - \theta) \cdot u_2$$

$$(1 - \theta) \cdot U = (1 - \theta) \cdot u_1 - (1 - \theta) \cdot u_2 \quad +$$

$$u_1 = \bar{u} + (1 - \theta) \cdot U$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + (1 - \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$$

$$\bar{u} = \theta \cdot u_1 + (1 - \theta) \cdot u_2$$

$$\theta \cdot U = \theta \cdot u_1 - \theta \cdot u_2 \quad -$$

$$u_2 = \bar{u} - \theta \cdot U$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$$

Voor de waterdiepte h kan op dezelfde manier worden herleid:

$$h_1 = \bar{h} + (1 - \theta) \cdot H$$

$$h_2 = \bar{h} - \theta \cdot H$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + (1 - \theta) \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial x} = \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} - \theta \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$U \ll \bar{u}$$

$$H \ll \bar{h}$$

en vanwege stationaire en uniforme stroming:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} = 0$$

B.1. Waterbeweging

$$\begin{aligned}
u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} &= -g \cdot \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} && \text{impulsvergelijking hoofdgeul} \\
u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} &= -g \cdot \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2} && \text{impulsvergelijking nevengeul} \\
\hline
u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} &= -\frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2} && \text{(B.6)}
\end{aligned}$$

Herschrijven van het linkerlid van Vergelijking (B.6) geeft:

$$\begin{aligned}
u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} &= (\bar{u} + (1-\theta) \cdot U) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + (1-\theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) - (\bar{u} - \theta \cdot U) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\
&= \bar{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + (1-2 \cdot \theta) \cdot U \cdot \frac{\partial U}{\partial x}
\end{aligned}$$

$$* \bar{u} \gg (1-2 \cdot \theta) \cdot U \quad \rightarrow \quad \text{tweede term in rechterlid kan worden verwaarloosd}$$

$$* U \ll \bar{u}$$

$$* \theta = \frac{B_1}{B_m} \quad \rightarrow \quad (1-2 \cdot \theta) \in [-1; 0] \quad \rightarrow \quad (1-2 \cdot \theta) \cdot U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \text{ verwaarlozen}$$

$$* B_1 \in [0,5 \cdot B_m; B_m] \quad u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = \bar{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad \text{(B.7)}$$

Herschrijven van het rechterlid van Vergelijking (B.6) geeft:

$$\begin{aligned}
-\frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2} &= -\frac{g}{C^2} \cdot \frac{(\bar{u} + (1-\theta) \cdot U)^2}{\bar{h} + (1-\theta) \cdot H} + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{(\bar{u} - \theta \cdot U)^2}{\bar{h} - \theta \cdot H} \\
&= -\frac{g}{C^2} \cdot \frac{(\bar{u}^2 + 2 \cdot (1-\theta) \cdot \bar{u} \cdot U + (1-\theta)^2 \cdot U^2) \cdot (\bar{h} - \theta \cdot H)}{(\bar{h} + (1-\theta) \cdot H) \cdot (\bar{h} - \theta \cdot H)} \\
&\quad + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{(\bar{u}^2 - 2 \cdot \theta \cdot \bar{u} \cdot U + \theta^2 \cdot U^2) \cdot (\bar{h} + (1-\theta) \cdot H)}{(\bar{h} - \theta \cdot H) \cdot (\bar{h} + (1-\theta) \cdot H)}
\end{aligned}$$

$$* U^2 \text{ en } H^2 \text{ verwaarlozen}$$

$$= \frac{g}{C^2} \cdot \frac{\bar{u}^2}{\bar{h} \cdot (\bar{h} + (1-2 \cdot \theta) \cdot H)} \cdot H - 2 \cdot \frac{g}{C^2} \cdot \frac{\bar{u}}{\bar{h} + (1-2 \cdot \theta) \cdot H} \cdot U$$

$$* H \ll \bar{h}$$

$$* (1-2 \cdot \theta) \in [-1; 0] \quad \rightarrow \quad (1-2 \cdot \theta) \cdot H \text{ verwaarlozen}$$

$$= \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2} = \frac{g}{C^2} \cdot \frac{\bar{u}^2}{\bar{h}^2} \cdot H - 2 \cdot \frac{g}{C^2} \cdot \frac{\bar{u}}{\bar{h}} \cdot U \quad \text{(B.8)}$$

$$\Rightarrow u_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = -\frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_1^2}{h_1} + \frac{g}{C^2} \cdot \frac{u_2^2}{h_2}$$

$$\leftrightarrow \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U}{\lambda_w} = \frac{\bar{u}}{h} \cdot \frac{H}{2 \cdot \lambda_w} \quad \text{waterbeweging} \quad (\text{B.9})$$

$$\lambda_w = \frac{C^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{h} \quad (\text{B.10})$$

relaxatielengte waterbeweging

B.2. Sedimentbeweging

B.2.1. Sedimentbalans

Aftrekken van elkaar van de sedimentbalansen van de subgeulen geeft:

$$B_1 \cdot \left[(1 - \varepsilon_p) \cdot \frac{\partial z_{b1}}{\partial t} + \frac{\partial s_1}{\partial x} \right] = -s_{tr} \quad \text{sedimentbalans Subgeul 1} \quad (\text{B.11})$$

$$B_2 \cdot \left[(1 - \varepsilon_p) \cdot \frac{\partial z_{b2}}{\partial t} + \frac{\partial s_2}{\partial x} \right] = s_{tr} \quad \text{sedimentbalans Subgeul 2} \quad (\text{B.12})$$

$$B_1 \cdot \left[(1 - \varepsilon_p) \cdot \frac{\partial z_{b1}}{\partial t} + \frac{\partial s_1}{\partial x} \right] - B_2 \cdot \left[(1 - \varepsilon_p) \cdot \frac{\partial z_{b2}}{\partial t} + \frac{\partial s_2}{\partial x} \right] = -2 \cdot s_{tr} \quad (\text{B.13})$$

*stationaire stroming: $\frac{\partial z_b}{\partial t} = 0$

Herschrijven van $\frac{\partial s}{\partial x}$:

$$s = s_m \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta_x} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} \right)$$

$$* s_m = m \cdot u_m^n$$

* β_x = correctiefactor voor de invloed van de helling in langsricting

$$* \frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} = -\frac{\partial h}{\partial x}$$

$$* \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

$$* \text{gelijk aan } u_1 \text{ en } h_1: \quad s_1 = \bar{s} + (1 - \theta) \cdot S$$

$$* \text{gelijk aan } u_2 \text{ en } h_2: \quad s_2 = \bar{s} - \theta \cdot S$$

$$* \text{gelijk aan } \bar{u} \text{ en } U \text{ en } \bar{h} \text{ en } H: \quad S \ll \bar{s}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{\partial s_1}{\partial x} &= \frac{ds_m}{du} \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\bar{s} + (1 - \theta) \cdot S}{\beta_x} \cdot \left(-\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - (1 - \theta) \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) \\ &= n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\bar{s}}{\beta_x} \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{S}{\beta_x} \cdot (1 - \theta)^2 \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \end{aligned}$$

*klein verhang: $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ verwaarlozen

$$\Rightarrow \frac{\partial s_1}{\partial x} = n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot (1 - \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{B.14})$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{\partial s_2}{\partial x} &= -\frac{ds_m}{du} \cdot \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\bar{s} - \theta \cdot S}{\beta_x} \cdot \left(-\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \theta \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) \\ &= -n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\bar{s}}{\beta_x} \cdot \theta \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{S}{\beta_x} \cdot \theta^2 \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \end{aligned}$$

*i klein: $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ verwaarlozen

$$\Rightarrow \frac{\partial s_2}{\partial x} = -n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{B.15})$$

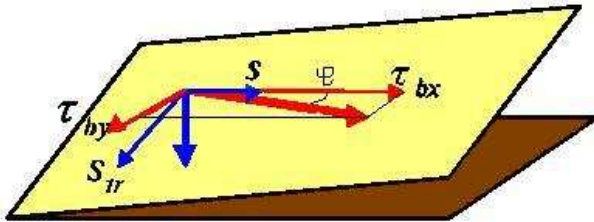
$$\rightarrow \frac{\partial (s_1 + s_2)}{\partial x} = n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{B.16})$$

Invullen in (B.13) geeft:

$$-\frac{B_1}{2} \cdot n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{B_m}{2} \cdot n \cdot \frac{\bar{s}}{u} \cdot \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = s_r \quad (\text{B.17})$$

B.2.2. Transportmodel

In Fig. B.2. is een definitieschets gegeven van de parameters:



Figuur B.2: Afleiding dwarstransport (De Vriend *et al.* [2001]).

Hierin is:	τ_b	resultante bodemschuifspanning	[N/m ²]
	τ_{bx}	bodemschuifspanning in x-richting	[N/m ²]
	τ_{by}	bodemschuifspanning in y-richting	[N/m ²]
	\bar{s}	resultante sedimenttransport per eenheid van breedte [m ² /s]	
	s	sedimenttransport per eenheid van breedte in x-richting	[m ² /s]
	s_{tr}	sedimenttransport per eenheid van breedte in y-richting	[m ² /s]
	φ	hoek tussen richting resultante bodemschuifspanning en bodemschuifspanning in x-richting	[° of rad]

s en s_{tr} kunnen worden geschreven als:

$$\begin{aligned} s &= f(\bar{s}, \text{bodempelling in langsrichting}) \\ &= \bar{s} \cdot \left[1 - \frac{1}{\beta_x} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

s_{tr} = $f(\bar{s}, \text{bodemschuifspanning, bodempelling in dwarsrichting})$

$$\begin{aligned} &= \bar{s} \cdot \left[\frac{\tau_{by}}{\tau_{bx}} - \frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta y} \right] \\ &= s \cdot \tan \varphi \\ \tan \varphi &= \frac{\frac{\tau_{by}}{\tau_{bx}} - \frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta y}}{1 - \frac{1}{\beta_x} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta x}} \quad \rightarrow \quad s_{tr} = \bar{s} \cdot \left[\frac{u_{tr}}{\bar{u}} - \frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta y} + \frac{\tau_{bsy}}{\bar{\tau}_b} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

$$\frac{\tau_{by}}{\tau_{bx}} = \frac{u_{tr}}{\bar{u}} + \frac{\tau_{bsy}}{\bar{\tau}_b}$$

Herschrijven van $\frac{u_{tr}}{\bar{u}}$ uit (B.19):

Aftrekken continuïteitsvergelijkingen:

$$\text{Subgeul 1: } u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\frac{q_{tr}}{B_1}$$

$$\text{Subgeul 2: } u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = \frac{q_{tr}}{B_2}$$

$$\frac{u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x}}{B_1 \cdot B_m - B_1^2} = q_{tr} \cdot \frac{-B_m}{B_1 \cdot B_m - B_1^2} \quad (\text{B.20})$$

Linkerlid herschrijven:

$$\begin{aligned} &u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} \\ &= (\bar{u} + (1-\theta) \cdot U) \cdot \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + (1-\theta) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) - (\bar{u} - \theta \cdot U) \cdot \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} - \theta \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) \\ &\quad + (\bar{h} + (1-\theta) \cdot H) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + (1-\theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) - (\bar{h} - \theta \cdot H) \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ &= \bar{u} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + (1-2 \cdot \theta) \cdot U \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{h} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + (1-2 \cdot \theta) \cdot H \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \end{aligned}$$

$$* U \ll \bar{u}$$

$$* H \ll \bar{h}$$

$$* \theta = \frac{B_1}{B_m} \quad \rightarrow \quad (1-2 \cdot \theta) \in [-1; 0] \quad \rightarrow \quad (1-2 \cdot \theta) \cdot U \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \text{ verwaarlozen}$$

$$* B_1 \in [0,5 \cdot B_m; B_m] \quad (1-2 \cdot \theta) \cdot H \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \text{ verwaarlozen}$$

$$u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = \bar{u} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{h} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{B.21})$$

$$\Rightarrow u_1 \cdot \frac{\partial h_1}{\partial x} - u_2 \cdot \frac{\partial h_2}{\partial x} + h_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} - h_2 \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} = q_{tr} \cdot \frac{-B_m}{B_1 \cdot B_m - B_1^2}$$

$$\Leftrightarrow \bar{u} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \bar{h} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} = q_{tr} \cdot \frac{-1}{\theta \cdot (B_m - B_1)}$$

$$* q_{tr} = u_{tr} \cdot \bar{h}$$

$$\Leftrightarrow u_{tr} = -\theta \cdot (B_m - B_1) \cdot \left[\frac{\bar{u}}{\bar{h}} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right] \quad (\text{B.22})$$

Herschrijven van $-\frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta y}$ uit (B.19):

$$* \frac{\Delta z_b}{\Delta y} = \frac{\Delta \zeta}{\Delta y} - \frac{\Delta h}{\Delta y}$$

$$* \frac{\Delta \zeta}{\Delta y} = 0$$

$$* \Delta h = h_1 - h_2 = H \text{ per subgeul}$$

$$\rightarrow 2 \cdot H \text{ over gehele geul}$$

$$* \Delta y = B_1 + B_2 = \theta \cdot B_m + (1 - \theta) \cdot B_m = B_m$$

$$\rightarrow \frac{\Delta z_b}{\Delta y} = -\frac{2 \cdot H}{B_m}$$

$$-\frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{\Delta z_b}{\Delta y} = -\frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{2 \cdot H}{B_m} \quad (\text{B.23})$$

Herschrijven van $\frac{\tau_{bsy}}{\bar{\tau}_b}$ uit (B.19):

$$* \text{zeer lange bocht: } u_{tr} = 0 \quad \rightarrow \quad s_{tr} = 0 = \bar{s} \cdot \left[\frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{2 \cdot H_{ce}}{B_m} + \frac{\tau_{bsy}}{\bar{\tau}_b} \right]$$

$$s_{tr} = 0 \quad \frac{\tau_{bsy}}{\bar{\tau}_b} = -\frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{2 \cdot H_{ce}}{B_m} \quad (\text{B.24})$$

(B.22), (B.23) en (B.24) invullen in (B.19)

$$s_{tr} = \bar{s} \cdot \left[-\theta \cdot (B_m - B_1) \cdot \left(\frac{1}{\bar{h}} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\bar{u}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{2 \cdot (H - H_{ce})}{B_m} \right] \quad (\text{B.25})$$

(B.17) en (B.25) gelijkstellen aan elkaar:

$$-\frac{B_1}{2} \cdot n \cdot \frac{s_m}{u_m} \cdot (1 - 2 \cdot \theta) \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{B_m}{2} \cdot n \cdot \frac{\bar{s}}{\bar{u}} \cdot \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$$

$$= \bar{s} \cdot \left[-\theta \cdot (B_m - B_1) \cdot \left(\frac{1}{\bar{h}} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\bar{u}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{\beta_y} \cdot \frac{2 \cdot (H - H_{ce})}{B_m} \right]$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{H}{\lambda_s^*} = \frac{H_{ce}}{\lambda_s^*} + [1 + n] \cdot \frac{\bar{h}}{\bar{u}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad \text{sedimentbeweging} \quad (\text{B.26})$$

$$\lambda_s^* = \frac{-\beta_y}{2 \cdot \bar{h}} \cdot \theta \cdot B_m \cdot (B_m - B_1) \quad (\text{B.27})$$

relaxatielengte sedimentbeweging

$$= \lambda_s \cdot 4 \cdot \theta \cdot (1 - \theta)$$

$$\lambda_s = \frac{-\beta_y}{8} \cdot \left(\frac{B_m}{\bar{h}} \right)^2 \cdot \bar{h} \quad (\text{B.28})$$

relaxatielengte sedimentbeweging in twee-geulenmodel met $B_1 = B_2 = \frac{1}{2} \cdot B_m$

$$= \frac{h_0}{(m \cdot \pi)^2} \cdot \left(\frac{B}{h_0} \right)^2 \cdot f(\theta)$$

$$\rightarrow \beta_y = \frac{-8}{(m \cdot \pi)^2} \cdot f(\theta) \quad (\text{B.29})$$

B.3. Totale oplossing

Herschrijven van H met behulp van Vergelijking (B.9):

$$H = 2 \cdot \lambda_w \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + 2 \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot U \quad (\text{B.30})$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = 2 \cdot \lambda_w \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2 \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{B.31})$$

Invullen in Vergelijking (B.26):

$$\begin{aligned} & 2 \cdot \lambda_w \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2 \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + 2 \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_s^*} \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{2}{\lambda_s^*} \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot U \\ & = 2 \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_s^*} \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U_{ce}}{\partial x} + \left[-1 + \frac{1}{1-\theta} \cdot \frac{n}{2} \cdot (1-2\theta) + \frac{1}{\theta \cdot (1-\theta)} \cdot \frac{n}{2} \cdot \theta \right] \cdot \frac{\bar{h}}{u} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \\ \Leftrightarrow & \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \left[\frac{3}{2 \cdot \lambda_w} - \frac{n}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s^*} \right] \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} \cdot U = \frac{1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} \cdot U_{ce} \end{aligned} \quad (\text{B.32})$$

De evenwichtsooplossing van Vergelijking (B.30) is:

$$\frac{1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} \cdot U = \frac{1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} \cdot U_{ce} \quad \Leftrightarrow \quad U = U_{ce}$$

* U_{ce} is de evenwichtswaarde voor U
 $= u_{1ce} - u_{2ce}$

$$* u_{1ce} = \text{evenwichtssnelheid in de hoofdgeul} \rightarrow U_{ce} = \frac{Q_{se}}{B_s \cdot h_s} - \frac{Q_{be}}{B_b \cdot h_b} \quad (\text{B.33})$$

$$\begin{aligned} & = u_s \\ & = \frac{Q_{se}}{B_s \cdot h_s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 *U_{2ce} &= \text{evenwichtssnelheid in de nevengeul} \\
 &= u_b \\
 &= \frac{Q_{be}}{B_b \cdot h_b}
 \end{aligned}$$

De totale oplossing is van de vorm:

$$\begin{aligned}
 U &= U_{ce} + \hat{U} \cdot e^{i \cdot k \cdot x_p} \\
 &= U_{ce} + \hat{U} \cdot e^{\frac{x_p}{L_D}} \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x_p}{L_p}
 \end{aligned} \tag{B.34}$$

Hierin is: \hat{U} amplitude verschil in snelheid tussen Subgeul 1 en Subgeul 2 [m/s]

Oplossing van k bepalen met behulp van de homogene oplossing van (B.30) ($U_{ce} = 0$):

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \left[\frac{3-n}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s^*} \right] \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} \cdot U = 0 \tag{B.35}$$

$$\begin{aligned}
 k_r &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(3-n)^2}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{n+1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} - \frac{1}{\lambda_s^*}} \\
 &= \frac{2 \cdot \pi}{L_p}
 \end{aligned} \tag{B.36}$$

$$\begin{aligned}
 k_i &= \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{3-n}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s^*} \right] \\
 &= \frac{1}{L_D}
 \end{aligned} \tag{B.37}$$

De oplossing voor het sedimenttransport ten gevolge van de primaire stroming S_{bp} is dan:

$$\begin{aligned}
 S_{bp} &= B_2 \cdot s_{bp} \\
 *s_{bp} &= m \cdot u_2^n \\
 *u_2 &= \bar{u} - \theta \cdot U && \rightarrow S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot (u_m - \theta \cdot U)^n \\
 *\bar{u} &= u_m
 \end{aligned} \tag{B.38}$$

Op dezelfde manier wordt de vergelijking voor het sedimenttransport naar de hoofdgeul ten gevolge van primaire stroming S_{sp} afgeleid:

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot (u_m + (1-\theta) \cdot U)^5 \tag{B.39}$$

B.4. Bepaling breedte stroombanen

De breedte van de stroombaan van de primaire stroming die naar de nevengeul gaat B_2 moet nog worden gedefinieerd. Doordat de moedergeul gekromd is, is het debiet niet meer gelijkmatig over de breedte verdeeld en kan niet meer worden gesteld dat $B_2 = B_m \cdot \frac{Q_{be}}{Q_{be} + Q_{se}}$. De breedte B_2 kan worden bepaald met de debietverdeling over de breedte, zie Vergelijking (B.40) en (B.41):

$$Q_2 = Q_{be} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot q_i \quad (\text{B.40})$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^n B_i \quad (\text{B.41})$$

Met behulp van vergelijkingen (B.40) en (B.41) kan wellicht een meer eenvoudige oplossing worden geleverd, zie Vergelijkingen (B.42) en (B.43):

$$Q_2 = B_2 \cdot h_2 \cdot u_2$$

$$* u = C \cdot \sqrt{R_h \cdot i}$$

$$* B \gg h \quad \rightarrow \quad R_h = h \quad \Rightarrow \quad u = C \cdot \sqrt{h \cdot i}$$

$$Q_2 = B_2 \cdot C_2 \cdot h_2^{\frac{3}{2}} \cdot i_2^{\frac{3}{2}} \quad (\text{B.42})$$

$$* S = B \cdot m \cdot u^n$$

$$\begin{aligned} S_2 &= B_2 \cdot m \cdot C_2^n \cdot h_2^{\frac{n}{2}} \cdot i_2^{\frac{n}{2}} \\ &= S_{bp} \end{aligned} \quad (\text{B.43})$$

Voor het transport naar de hoofdgeul ten gevolge van primaire stroming kan op dezelfde manier worden afgeleid:

$$Q_1 = Q_{se} = \sum_{j=1}^m B_j \cdot q_j \quad (\text{B.44})$$

$$B_1 = \sum_{j=1}^m B_j \quad (\text{B.45})$$

$$Q_1 = B_1 \cdot C_1 \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \cdot i_1^{\frac{3}{2}} \quad (\text{B.46})$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot C_1^5 \cdot h_1^{\frac{5}{2}} \cdot i_1^{\frac{5}{2}} \quad (\text{B.47})$$

Invullen van $n = 5$ volgens Engelund-Hansen [1967] geeft:

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot C_2^5 \cdot h_2^{\frac{5}{2}} \cdot i_2^{\frac{5}{2}} \quad (\text{B.48})$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot C_1^5 \cdot h_1^{\frac{5}{2}} \cdot i_1^{\frac{5}{2}} \quad (\text{B.49})$$

Deze oplossing geeft ook behoud van sedimenttransport. Uitschrijven van Vergelijking (B.38) geeft na weglating van termen met U^2 of hoger:

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot (u_m - \theta \cdot U)^n \quad \rightarrow \quad S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot u_m^n \left(1 - \frac{n}{u_m} \cdot \theta \cdot U\right) \quad (\text{B.50})$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot (u_m + (1-\theta) \cdot U)^5 \quad \rightarrow \quad S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot u_m^n \cdot \left(1 + \frac{n}{u_m} \cdot (1-\theta) \cdot U\right) \quad (\text{B.51})$$

Voor behoud van sedimenttransport moet gelden:

$$S_m = S_1 + S_2$$

$$\Leftrightarrow B_m = B_1 \cdot \left(1 + \frac{n}{u_m} \cdot (1-\theta) \cdot U\right) + B_2 \cdot \left(1 - \frac{n}{u_m} \cdot \theta \cdot U\right)$$

$$* \theta = \frac{B_1}{B_m}$$

$$B_m = B_1 \cdot \left(1 + \frac{n}{u_m} \cdot \left(1 - \frac{B_1}{B_m}\right) \cdot U\right) + B_2 \cdot \left(1 - \frac{n}{u_m} \cdot \frac{B_1}{B_m} \cdot U\right) = B_1 + B_2$$

B.5. Samenvatting

B.5.1. Nauwkeurige oplossing

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot u_m^n \left(1 - \frac{n}{u_m} \cdot \theta \cdot U\right)$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot u_m^n \cdot \left(1 + \frac{n}{u_m} \cdot (1-\theta) \cdot U\right)$$

De parameters worden als volgt bepaald:

$$Q_2 = Q_{be} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot q_i$$

$$Q_1 = Q_{se} = \sum_{j=1}^m B_j \cdot q_j$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^n B_i$$

$$B_1 = \sum_{j=1}^m B_j$$

$$\theta = \frac{B_m - B_2}{B_m}$$

$$U = U_{ce} + \hat{U} \cdot e^{-\frac{x_p}{L_D}} \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot x_p}{L_p}$$

$$\frac{2 \cdot \pi}{L_p} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(3-n)^2}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{n+1}{\lambda_w \cdot \lambda_s^*} - \frac{1}{\lambda_s^*}}$$

$$\frac{1}{L_D} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{3-n}{2 \cdot \lambda_w} + \frac{1}{\lambda_s^*} \right]$$

$$\lambda_w = \frac{C^2}{2 \cdot g} \cdot \bar{h}$$

$$\lambda_s^* = \lambda_s \cdot 4 \cdot \theta \cdot (1-\theta)$$

$$\lambda_s = \frac{\bar{h}}{(m \cdot \pi)^2} \cdot \left(\frac{B_m}{\bar{h}} \right)^2 \cdot f(\theta)$$

B.5.2. Eenvoudige oplossing

$$S_{bp} = B_2 \cdot m \cdot C_2^5 \cdot h_2^{\frac{5}{2}} \cdot i_2^{\frac{5}{2}}$$

$$S_{sp} = B_1 \cdot m \cdot C_1^5 \cdot h_1^{\frac{5}{2}} \cdot i_1^{\frac{5}{2}}$$

De parameters worden als volgt bepaald:

$$Q_2 = Q_{be} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot q_i$$

$$Q_1 = Q_{se} = \sum_{j=1}^m B_j \cdot q_j$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^n B_i$$

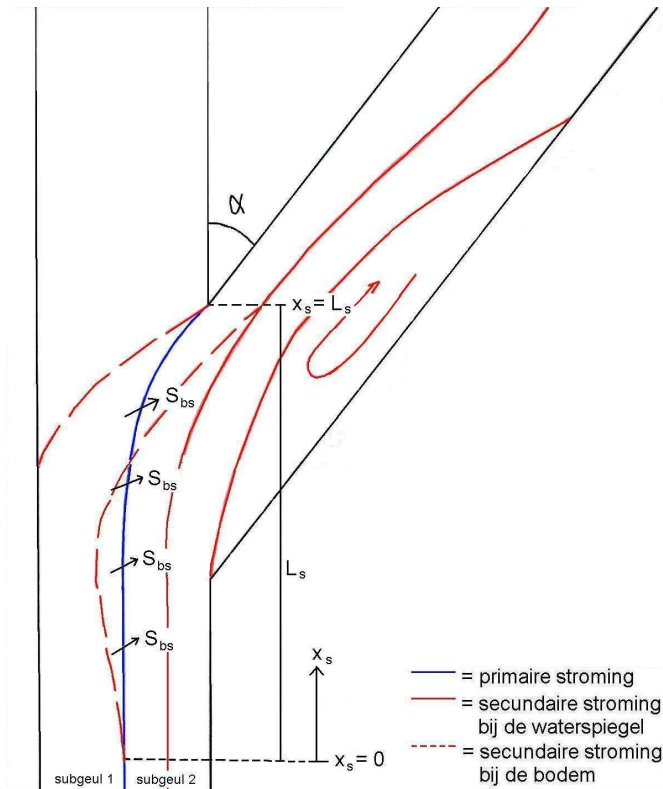
$$B_1 = \sum_{j=1}^m B_j$$

$$Q_2 = B_2 \cdot C_2 \cdot h_2^{\frac{3}{2}} \cdot i_2^{\frac{3}{2}}$$

$$Q_1 = B_1 \cdot C_1 \cdot h_1^{\frac{3}{2}} \cdot i_1^{\frac{3}{2}}$$

C. AFLEIDING LOKALE SEDIMENTBEWEGING

In deze bijlage wordt een relatie afgeleid voor het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de secundaire stroming. De secundaire stroming veroorzaakt een spiraalstroming ter plaatse van het splitsingspunt en beschrijft een bochtstroming. Het sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van de secundaire stroming bestaat dan uit het sediment in Subgeul 1 dat door de spiraalstroming naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd, zie Fig. C.1:



Figuur C.1: Sediment uit Subgeul 1 dat naar Subgeul 2 of de nevengeul wordt getransporteerd onder invloed van de circulatiestroming.

Hierin is: s_{bs} sedimenttransport per eenheid van lengte ten gevolge van secundaire stroming [m²/s]
 L_s verstoringlengte in bovenstroomse richting [m]
 x_s afstand in benedenstroomse richting vanaf het begin van de lokale verstoring [m]

Het sedimenttransport per eenheid van lengte ten gevolge van secundaire stroming s_{bs} is afhankelijk van het sedimenttransport in Subgeul 1, de lengte in bovenstroomse richting waarover de sedimentbeweging wordt verstoord door het splitsingspunt, de richting van het sedimenttransport ter plaatse van het splitsingspunt en de sedimentverdeling over de diepte. Hieruit volgt Vergelijking (C.1):

$$s_{bs} = f(s_1(x), \text{verstoringlengte sedimentbeweging, richting sedimenttransport, afmetingen naar, sedimentverdeling over de diepte}) \quad (\text{C.1})$$

In de volgende paragrafen zullen deze parameters worden beschreven. De parameter s_1 zal pas in § C.5 worden beschreven, omdat deze afhankelijk blijkt te zijn van de richting van het sedimenttransport (zie § C.2).

C.1. Verstoringslengte sedimentbeweging

Voor de verstoringslengte in bovenstroomse richting L_s , moet de afstand worden genomen waarover de waterbeweging wordt verstoord. De sedimentbeweging is immers een gevolg van de waterbeweging. De lokale verstoring van de waterbeweging door het splitsingspunt vindt over zo'n kleine afstand plaats, dat wrijving verwaarloosd kan worden. Dit betekent dat de advectieve termen $u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ in Vergelijking

(3.2) belangrijk zijn. De wervelsterkte in een 2-D –omgeving wordt gedefinieerd volgens Vergelijking (C.2) (El-Sayed [1995]):

$$\omega_z = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (C.2)$$

$$\text{*rotatievrije stroming: } \omega = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (C.3)$$

$$\text{*stationaire stroming} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{continuïteit} \quad (C.4)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (C.5)$$

*gelijkmatige verdeling van u over de breedte levert de triviale oplossing.

$$\text{*variatie van } u \text{ over de breedte (Crosato [1990])} \quad \rightarrow \quad u = \bar{u} + u'(0, y) \quad (C.6)$$

Hierin is: $u'(0, y)$ afwijking van u van de gemiddelde waarde \bar{u} in dwarsrichting [m/s]

$$\text{*definitie } u': \quad u' = \hat{U}_s(x) \cdot \sin \frac{m \cdot \pi}{B_m} \cdot y \quad (C.7)$$

Hierin is: $\hat{U}_s(x)$ amplitude van de afwijking in dwarsrichting van de gemiddelde snelheid in langsrichting [m/s]

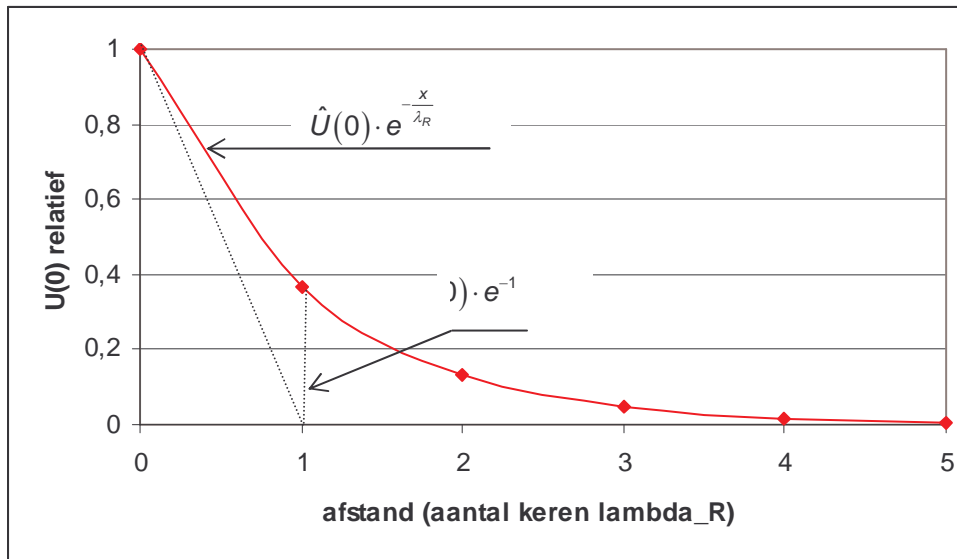
*substitutie van Vergelijking (C.6) en (C.7) in Vergelijking (C.5)

$$\rightarrow \quad \hat{U}_s = e^{\frac{x}{\lambda_R}} \quad (C.8)$$

Hierin is: λ_R relaxatielengte rotatievrije stroming [m]
 $= \pm \frac{B}{m \cdot \pi}$ (C.9)

Vergelijking (C.8) houdt in dat de verstoring na een lengte λ_R is afgenomen tot $\frac{\hat{U}(0)}{e^1} = 0,37 \cdot \hat{U}(0)$ en na

een afstand $5 \cdot \lambda_R$ is afgenomen tot $\frac{\hat{U}(0)}{e^5} = 0,01 \cdot \hat{U}(0)$, zie ook Fig. C.2.



Figuur C.2: Bepaling afstand waarover verstoring verwaarloosbaar is uitgedrukt in aantal keren λ_R .

Met behulp van Vergelijking (C.9) en Fig. C.2 kan de totale verstoring lengte worden geschreven met Vergelijking (C.11):

$$L_s = a \cdot \lambda_R \quad (\text{C.10})$$

$$= a \cdot \frac{B_m}{m \cdot \pi} \quad (\text{C.11})$$

Hierin is: a calibratiefactor voor de verstoring lengte [-]
 = 5

De coëfficiënt m heeft de waarde 1. De breedte van de stroming die verstoord wordt, varieert. Aan het einde van de verstoring, op $x_s = L_s$, is de breedte van de verstoerde stroming gelijk aan de breedte van de primaire stroming die naar de nevengeul gaat B_2 . In stroomopwaartse richting verspreid de verstoring zich over de breedte. Aan het begin van de verstoring, op $x_s = 0$, is de breedte van de verstoerde stroming gelijk aan B_m . Aangezien $B_2 < B_m$ lijkt invullen van B_m een veilige aanname.

C.2. Richting sedimenttransport

De richting van het sedimenttransport wordt bepaald door de richting van de bodemschuifspanning en de zwaartekracht. De richting van de bodemschuifspanning wordt beschreven met Vergelijking (C.12) (Struiksma & Crosato [1989]):

$$\tan \delta = \frac{v}{u} - A \cdot \frac{h}{R} \quad (\text{C.12})$$

De term $\frac{v}{u}$ geeft de verhouding tussen de snelheden in dwarsrichting en langsrichting aan. Aan de hand van Fig. 2.12 kan worden bepaald dat er in dwarsrichting netto geen uitwisseling van debiet is. De term $\frac{v}{u}$ in Vergelijking (C.12) kan dus worden verwaarloosd.

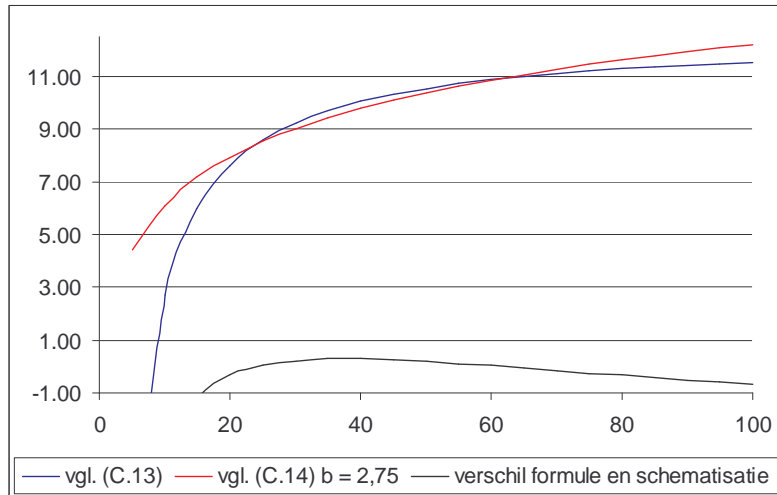
De parameter A kan worden herschreven tot Vergelijking (C.14), zie ook Fig. C.3:

$$A = 2 \cdot \frac{\varepsilon}{\kappa^2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa \cdot C} \right)$$

$$= 12,5 - 31,25 \cdot \frac{\sqrt{g}}{C} \quad (\text{C.13})$$

$$= b \cdot \ln(C) \quad (\text{C.14})$$

Hierin is: b calibratiefactor voor de coëfficiënt voor de richting van de [-]
snelheid bij de bodem bij een logaritmisch snelheidsprofiel
calibratiefactor
= 2,75



Figuur C.3: Schematisatie A.

De term $A \cdot \frac{h}{R}$ kan worden herschreven tot Vergelijking (C.15):

$$A \cdot \frac{h}{R} = b \cdot \ln(C) \cdot \frac{h}{R} \quad (\text{C.15})$$

De invloed van de zwaartekracht wordt bepaald door de bodemhellingen in langs- en dwarsrichting. De richting van het sedimenttransport wordt dan (Koch & Flokstra [1980]):

$$\tan \gamma = \frac{\sin \delta - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial y}}{\cos \delta - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x}} \quad (\text{C.16})$$

$$* B \ll R. \quad \rightarrow \quad \tan \gamma = \frac{v}{u} - A \cdot \frac{h}{R} + \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$$

Hierin is: γ hoek sedimentbeweging met waterbeweging [° of rad]

In de term $-\frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial y}$ kan $\frac{\partial z_b}{\partial y}$ vervangen worden door $\frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{B_1 + B_2}$. De waarden van de parameters h_1 ,

h_2 , B_1 en B_2 kunnen worden berekend met Vergelijkingen (3.27) tot en met (3.34). In de term $-\frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x}$

is $\frac{\partial z_b}{\partial x} = i$, zodat deze term verwaarloosd kan worden.

Combinatie van de Vergelijkingen (C.12), (C.15) en (C.16) voor kleine δ :

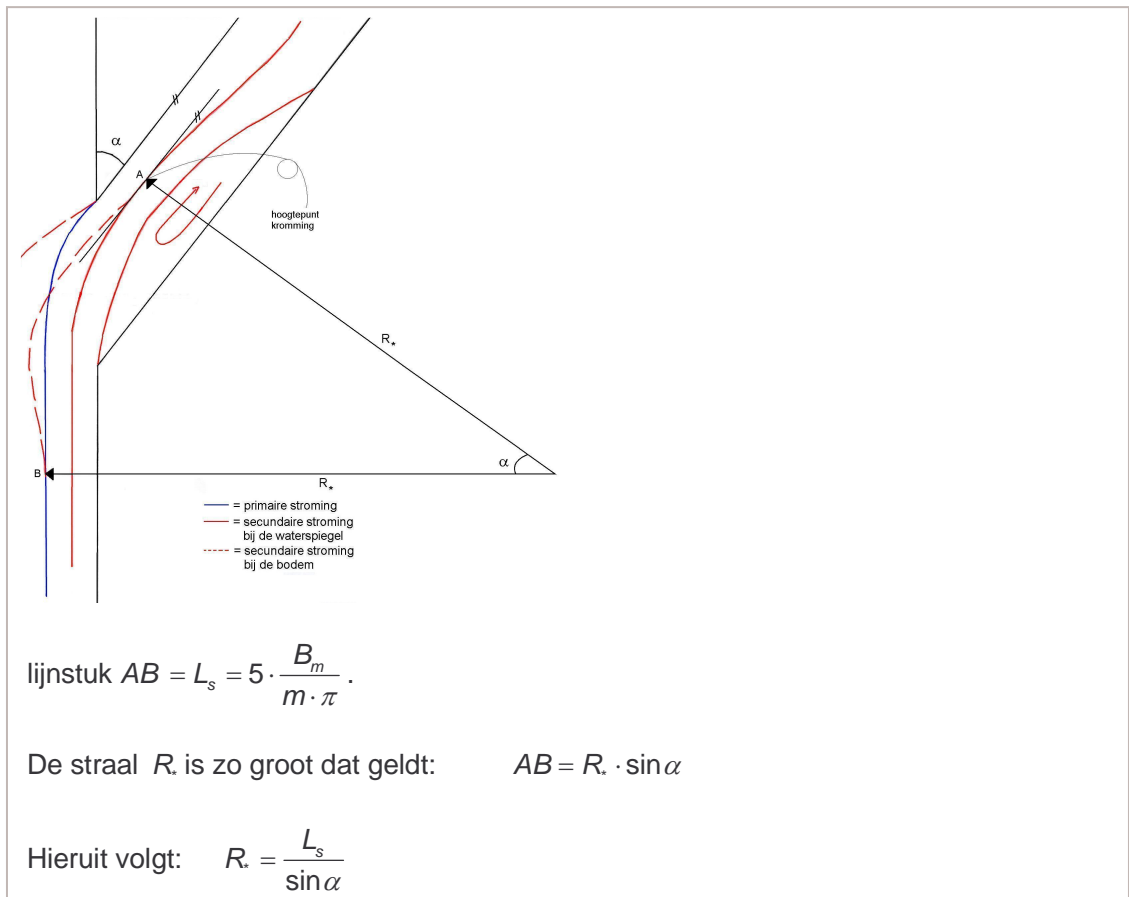
$$\begin{aligned}\tan \gamma &= -A \cdot \frac{h}{R} + \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \\ &= -b \cdot \ln(C) \cdot \frac{h}{R} - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{B_1 + B_2}\end{aligned}$$

$$*\gamma \text{ klein} \quad \rightarrow \quad \tan \gamma = \gamma$$

$$\gamma = -b \cdot \ln(C) \cdot \frac{h}{R} - \frac{1}{f(\theta)} \cdot \frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{B_1 + B_2} \quad (\text{C.17})$$

De straal R van de kromming van de stroming wordt als volgt gedefinieerd, zie Vergelijking (C.18) en Fig. C.4:

$$R = \frac{L_s}{\sin \alpha} \quad (\text{C.18})$$



Figuur C.4: Afleiding relatie $L_s - R - \alpha$.

C.3. Afmetingen neer

Over neervorming bij splitsingspunten is geen kwantitatieve beschrijving in de literatuur beschikbaar. Uit de literatuurstudie is gebleken dat de grootte van de neer afhankelijk is van:

- de grootte van het debiet in de moedergeul Q_m ;
- de hoek van afsplitsing α .

Dit betekent dat de afmetingen van de neer een maat zijn voor de hoeveelheid impuls die niet gegenereerd kan worden om debiet af te buigen naar de nevengeul. In de vergelijking die in § 3.3 wordt opgesteld, zal de coëfficiënt c worden toegevoegd die de invloed hiervan weergeeft. In Hoofdstuk 4 zullen de bestaande waarnemingen worden geanalyseerd en kan de vorm van de coëfficiënt c worden bepaald.

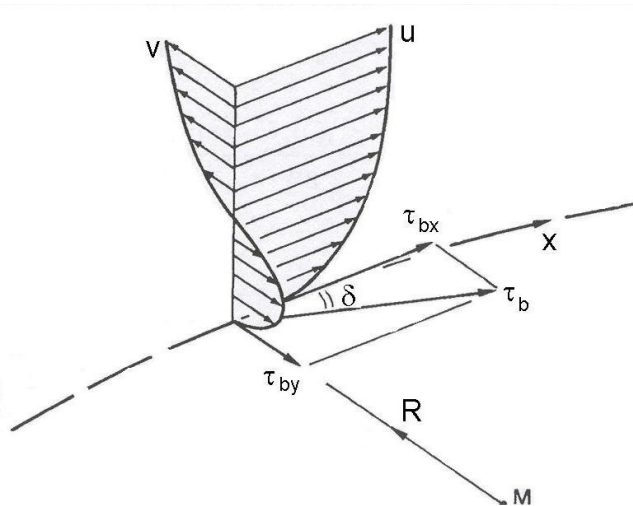
C.4. Sedimentverdeling over de diepte

In de voorgaande paragraaf is het bodemtransport bekeken. Sediment dat in suspensie wordt getransporteerd, wordt geacht zo weinig gewicht te hebben dat dit de waterbeweging volgt. De hoeveelheid transport van gesuspendeerd sediment ten gevolge van secundaire stroming over de scheidingslijn van de primaire stroming kan nu gedefinieerd worden door Vergelijking (C.19):

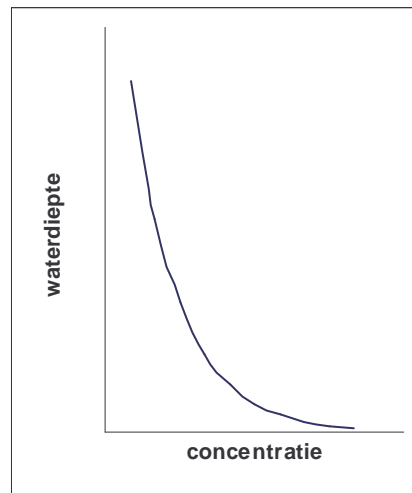
$$S_{tr} = \int_0^h c_s(z) \cdot v(z) dz \quad (C.19)$$

Hierin is: S_{tr} transversale suspensietransport $[m^3/s]$
 c_s concentratie sediment in suspensie $[m^3/m^3]$

In Fig. C.5 staat een karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming en in Fig. C.6 een karakteristieke concentratieverdeling van het sediment over de diepte.



Figuur C.5: Karakteristiek profiel voor de uitwisseling van debiet ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming.



Figuur C.6: Concentratieverdeling sediment over de diepte.

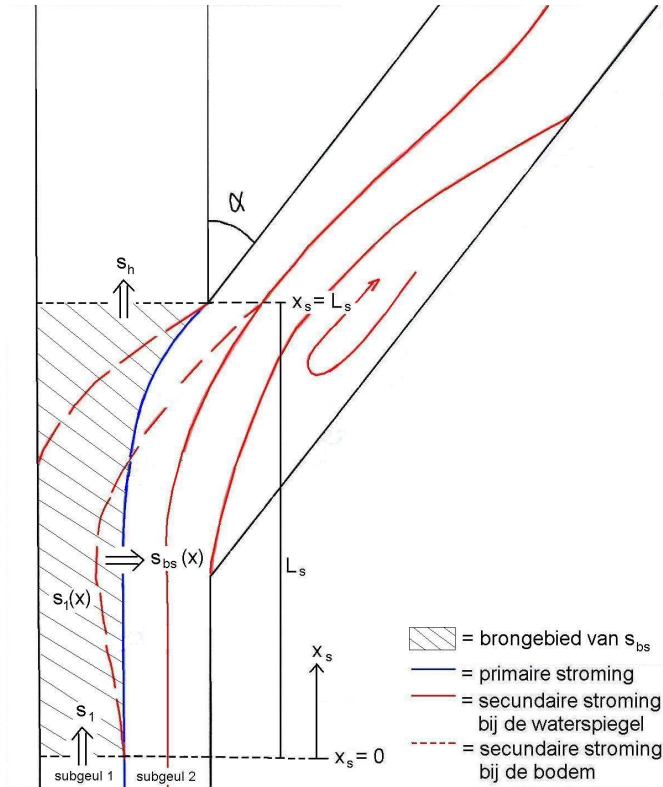
In Fig. C.5 is te zien dat het water uit de bovenste helft van de waterkolom van Subgeul 2 naar de hoofdgeul wordt getransporteerd door het optreden van secundaire stroming. Het sediment in de bovenste helft van de waterkolom wordt getransporteerd via suspensietransport. Sediment in suspensie volgt de waterbeweging en dus kan worden aangenomen dat het profiel in Fig. C.5 ook representatief is voor de bruto uitwisseling van gesuspendeerd sediment ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming.

In Fig. C.6 is te zien dat de sedimentconcentratie in het deel van de waterkolom waarin transport van sediment uit Subgeul 2 naar de hoofdgeul plaatsvindt, zeer klein is. Op basis hiervan wordt de invloed van

uitwisseling van sediment ter plaatse van de scheidingslijn van de primaire stroming onder invloed van de stroming in dwarsrichting verwaarloosd.

C.5. Sedimenttransport per eenheid van breedte

Het sedimenttransport per eenheid van breedte in Subgeul 1 neemt af in benedenstroomse richting, doordat sediment zijwaarts richting nevengeul wordt getransporteerd, zie Fig. C.7.



Figuur C.7: Balansgebied om $s_1(x)$ te bepalen.

Aangenomen wordt dat de aanpassing van het sedimenttransport per eenheid van breedte en de richting van het sedimenttransport zich exponentieel ontwikkelen vanaf het begin van de kromming. Het verloop van het sedimenttransport in langsricting kan dan worden beschreven met Vergelijking (C.20):

$$s_1(x) = \left[s_1 - (s_1 - s_h) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_r} - a\right)} \right] \cdot \left[1 - \left(\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha + \gamma_b - \gamma_s\right) \right) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_r} - a\right)} \right] \quad (\text{C.20})$$

C.6. Totale oplossing uit theorie

Het sedimenttransport per eenheid van breedte ten gevolge van de secundaire stroming s_{bs} is gedefinieerd volgens Vergelijking (C.1):

$$s_{bs} = f(s_1(x), \text{verstoringslengte sedimentbeweging, richting sedimenttransport, afmetingen neer, sedimentverdeling over de diepte})$$

$$= f\left(s_1(x), L_s, \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \alpha + \gamma_b + \gamma_s\right), c\right) \quad (\text{C.21})$$

Hierin is: c coëfficiënt die een maat is voor de niet gegenereerde [-]

hoeveelheid impuls om debiet af te buigen naar de nevengeul

Vanaf het punt $x_s = 0$ in benedenstroomse richting is de lokale verstoring in de waterbeweging merkbaar. Deze verstoring veroorzaakt een circulatiestroming. De circulatiestroming zal zich onder invloed van de opgelegde kromming exponentieel ontwikkelen tot een maximale waarde. Het sedimenttransport van de moedergeul naar de nevengeul per eenheid van lengte ten gevolge van de secundaire stroming wordt nu als volgt gedefinieerd:

$$\begin{aligned}
 s_{bs} &= s_1(x) \cdot \sin(\gamma_b) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_R} - a\right)} \\
 &= \left[s_1 - (s_1 - s_h) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_r} - a\right)} \right] \cdot \left[1 - (\sin(\gamma_b)) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_r} - a\right)} \right] \cdot [\sin(\gamma_b)] \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_R} - a\right)} \quad (C.22)
 \end{aligned}$$

Het totale sedimenttransport naar de nevengeul ten gevolge van secundaire stroming S_{bs} wordt gegeven door Vergelijking (C.23):

$$\begin{aligned}
 S_{bs} &= \int_0^{L_s} s_{bs} dx \\
 &= \int_0^{L_s} \left(s_1(x) \cdot \sin(\gamma_b) \cdot e^{\left(\frac{x}{\lambda_R} - a\right)} \right) dx \\
 &= \left[\frac{1}{a} \cdot s_1 - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (s_1 - s_s) + \left(-\frac{1}{2 \cdot a} \cdot s_1 + \frac{1}{3 \cdot a} \cdot (s_1 - s_s) \right) \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_s \quad (C.23)
 \end{aligned}$$

C.7. Vereenvoudiging totale oplossing

In Vergelijking (C.20) moet de term die $s_1(x)$ beschrijft, worden vereenvoudigd om tot een handzame relatie te komen. Hiervoor wordt een analyse uitgevoerd om de grootte van de termen te bepalen. Het sedimenttransport per eenheid van breedte in de hoofdgeul s_s moet eigenlijk worden bepaald via een recursieve berekening. In dit onderzoek wordt s_s gedefinieerd alsof er behoud van het totale sedimenttransport is in Subgeul 1, zie Vergelijking (C.24). Uit de handberekeningen moet blijken of S_{bs} zo klein is dat deze aanname kan worden gedaan.

$$s_h = s_1 \cdot \frac{B_1}{B_h} \quad (C.24)$$

$$\begin{aligned}
 * B_h \in [B_1; 0,5 \cdot B_1] &\rightarrow \frac{B_1}{B_h} \in [0,5; 1] \\
 &\rightarrow s_s \in [0,5 \cdot s_1; s_1]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * s_1 &= 1 \\
 * a &= 5 \\
 * c &= 1 \\
 * \sin(\gamma_b) &= \sin \sigma \\
 * \sigma &\in [0^\circ; 180^\circ]
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{a} \cdot s_1 - \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (s_1 - s_h) + \left(-\frac{1}{2 \cdot a} \cdot s_1 + \frac{1}{3 \cdot a} \cdot (s_1 - s_h) \right) \cdot \sin(\gamma_b)$$

$$= 0,2 \cdot s_1 - 0,1 \cdot \left(s_1 - s_1 \cdot \frac{B_1}{B_h} \right) + \left(-0,1 \cdot s_1 + 0,07 \cdot \left(s_1 - s_1 \cdot \frac{B_1}{B_h} \right) \right) \cdot \sin \sigma \quad (\text{C.25})$$

Invullen in van Vergelijking (C.25) in Vergelijking (C.23):

$$*L_S = 1$$

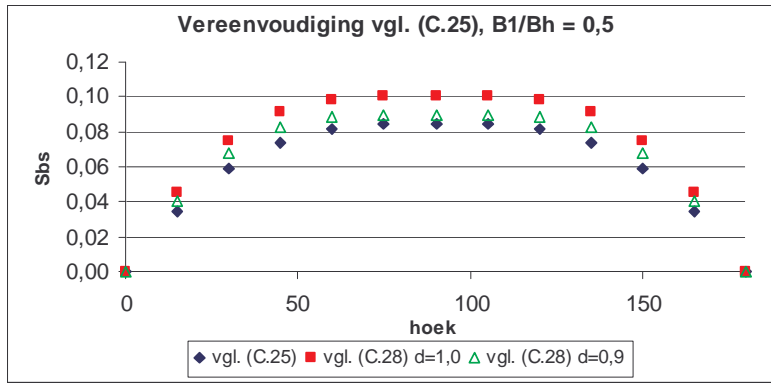
$$S_{bs} = \left[0,2 \cdot s_1 - 0,1 \cdot \left(s_1 - s_1 \cdot \frac{B_1}{B_h} \right) + \left(-0,1 \cdot s_1 + 0,07 \cdot \left(s_1 - s_1 \cdot \frac{B_1}{B_h} \right) \right) \cdot \sin \sigma \right] \cdot \sin \sigma \cdot 1 \quad (\text{C.26})$$

Vergelijking (C.25) kan worden vereenvoudigd door de termen die de parameter s_h bevatten, te elimineren, zie ook Fig. C.8 tot en met C.10:

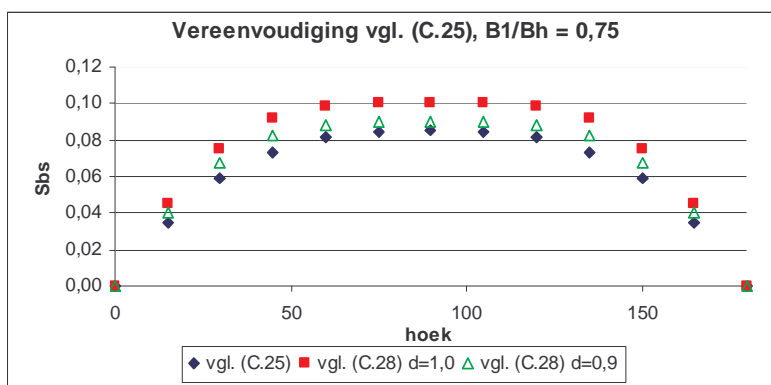
$$S_{bs} = \frac{d}{a} \cdot s_1 \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \sin(\gamma_b) \right] \cdot \sin(\gamma_b) \cdot L_S \quad (\text{C.27})$$

$$S_{bs} = d \cdot s_1 \cdot [0,2 - 0,1 \cdot \sin \sigma] \cdot \sin \sigma \cdot 1 \quad (\text{C.28})$$

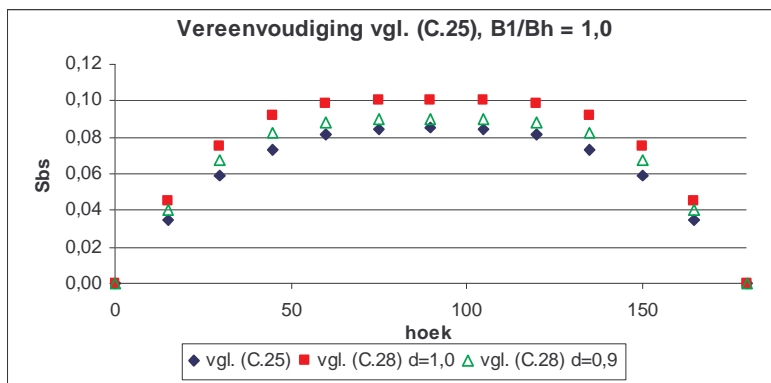
Hierin is: d calibratiefactor
 = 0,9



Figuur C.8: Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_h} = 0,5$.



Figuur C.9: Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_h} = 0,75$.



Figuur C.10: Vereenvoudiging van Vergelijking (C.25), $\frac{B_1}{B_h} = 1,0$.

D. NUMERIEKE GEGEVENS VALIDATIE

D.1. Riad

In Tabel D.1 zijn de resultaten van de berekeningen voor de situatie van Riad [1961] weergegeven.

Tabel D.1: Numerieke gegevens berekeningen Riad.

nummer berekening	waarnemingen	Ri1	Ri2	Ri3
$\frac{Q_s}{Q_b}$		$c = 1$	$c = 0,00225 \cdot 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = 0,2 \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{Q_s}{Q_b}}$
1,01	0,02	0,56	0,01	0,11
1,60	0,15	0,89	0,08	0,24
1,66	0,18	0,92	0,09	0,26
1,72	0,27	0,96	0,11	0,28
1,82	0,36	1,01	0,15	0,33
1,96	0,44	1,08	0,22	0,41
2,00	0,52	1,12	0,28	0,48
2,05	0,54	1,10	0,25	0,44
2,07	0,62	1,13	0,30	0,50
2,14	0,63	1,16	0,36	0,55
2,39	1,11	1,28	0,71	0,86
2,58	2,33	1,37	1,16	1,21
2,74	2,62	1,43	1,76	1,65
2,82	3,77	1,49	2,20	1,96
3,53	7,79	1,75	13,39	8,54

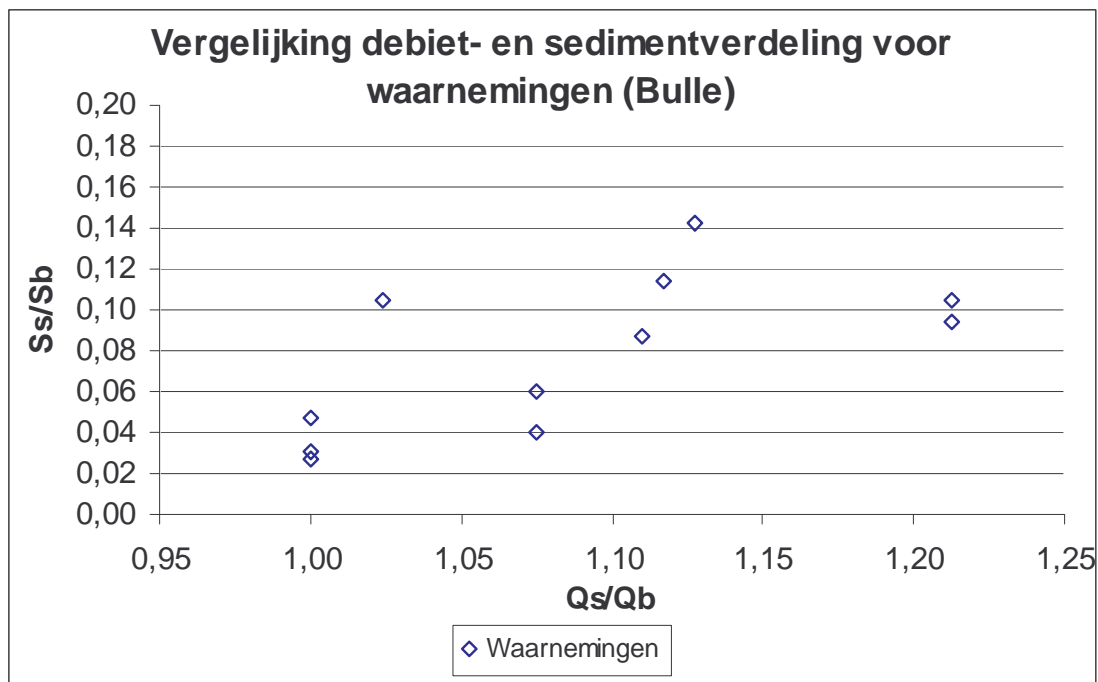
De

D.2. Bulle

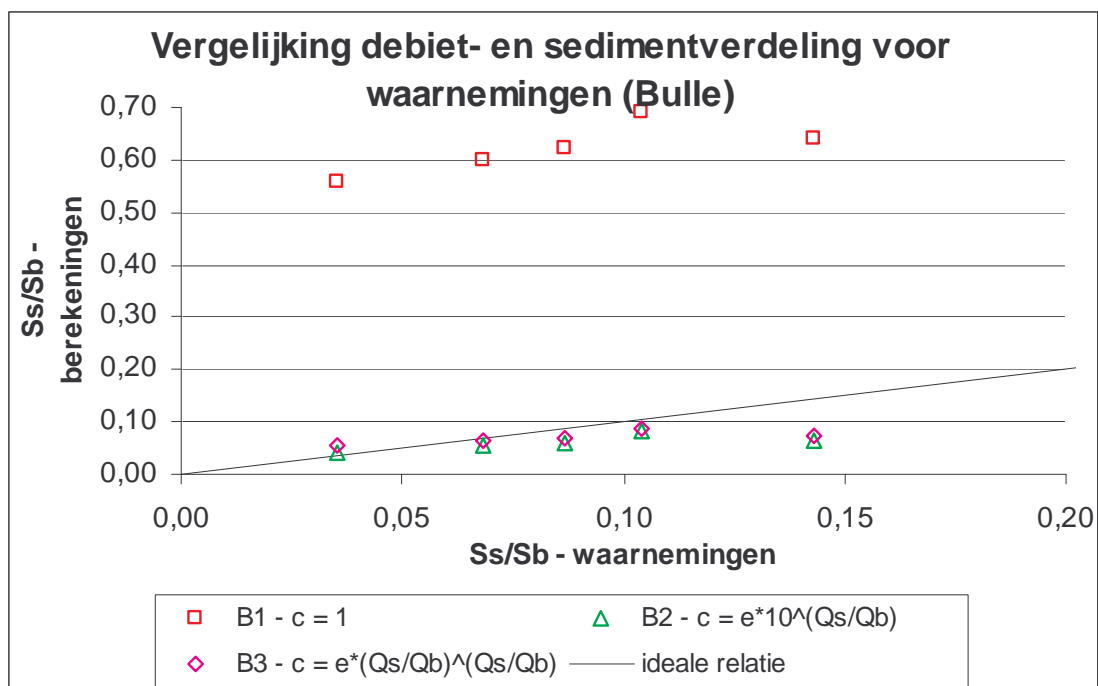
invoerparameters voor de handberekeningen voor de proefopstelling van Bulle [1926] en de situaties die worden nagerekend zijn weergegeven in Tabel D.2. De resultaten zijn weergegeven in Fig. D.1 tot en met D.3. en tabel D.3.

Tabel D.2: Invoerparameters handberekeningen Bulle.

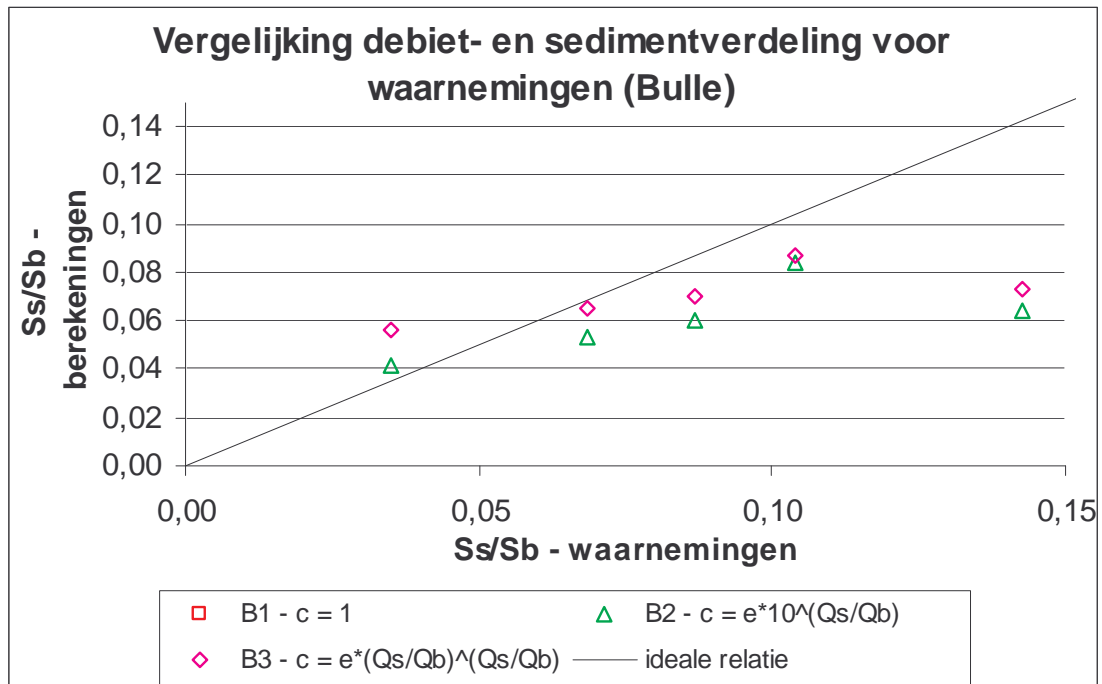
nummer berekening parameter	waarnemingen	B1	B2	B3
		$c = 1$	$c = e \cdot 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = e \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{1}{f} \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$
Q_m	5 l/s	5 l/s	5 l/s	5 l/s
Q_s	2,5 - 2,74 l/s	2,5 - 2,74 l/s	2,5 - 2,74 l/s	2,5 - 2,74 l/s
Q_b	2,26 - 2,5 l/s	2,26 - 2,5 l/s	2,26 - 2,5 l/s	2,26 - 2,5 l/s
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,00 - 1,21	1,00 - 1,21	1,00 - 1,21	1,00 - 1,21
B_m	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,2 m
B_s	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,2 m
B_b	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,2 m
$\frac{B_s}{B_b}$	1,0	1,0	1,0	1,0
C	$36,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$36,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$36,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$	$36,5 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
i	0,003	0,003	0,003	0,003
h_m	69 - 80 mm	69 - 80 mm	69 - 80 mm	69 - 80 mm
D	$D_{50} = 0,7 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,7 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,7 \text{ mm}$	$D_{50} = 0,7 \text{ mm}$
α	30 - 150°	30 - 150°	30 - 150°	30 - 150°
a (calibratiefactor)	5	5	5	5
b (calibratiefactor)	2,75	2,75	2,75	2,75
d (calibratiefactor)	0,9	0,9	0,9	0,9
e (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	0,0075	0,2
e (calibratiefactor)	niet in vgl.	niet in vgl.	niet in vgl.	1



Figuur D.1: Vergelijking debiet- en sedimentverdeling voor waarnemingen van Bulle.



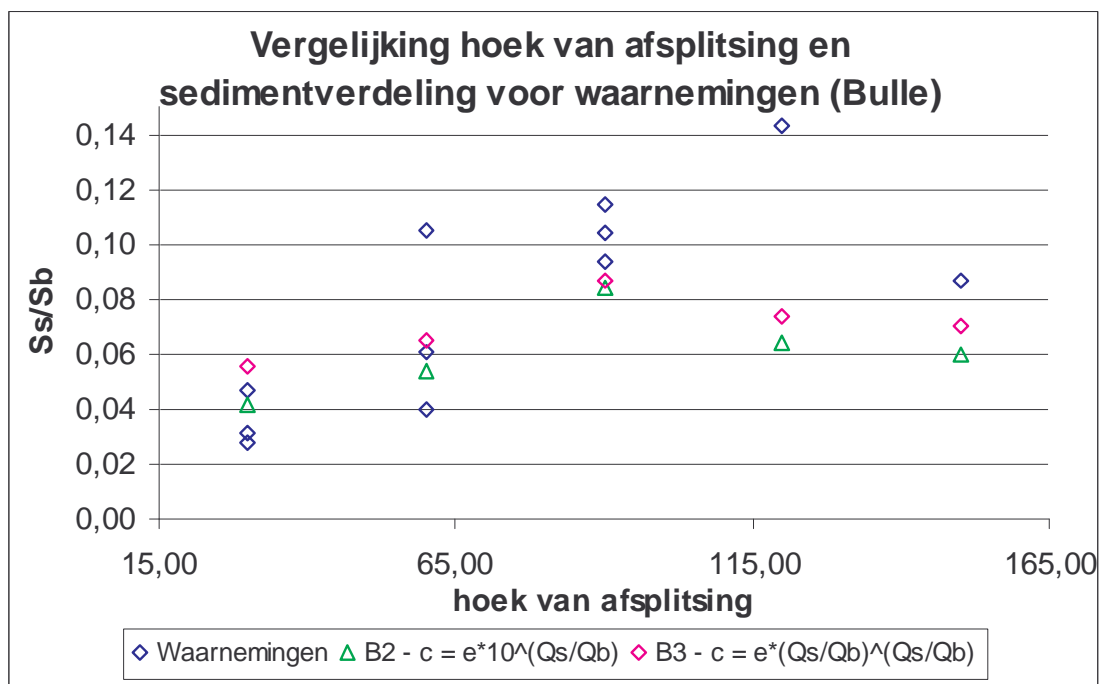
D.2a: Vergelijking waarnemingen en berekeningen wat betreft debiet- en sedimentverdeling voor Bulle voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0; \rightarrow)$. In B2 geldt $e = 0,0075$ en in B3 geldt $e = 0,1$.



D.2b: Vergelijking waarnemingen en berekeningen wat betreft debiet- en sedimentverdeling voor Bulle voor $\frac{S_s}{S_b} \in [0; 0,15]$. In

B2 geldt $e = 0,0075$ en in B3 geldt $e = 0,1$.

Figuur D.2: Vergelijking waarnemingen en berekeningen voor Bulle. In B2 geldt $e = 0,0075$ en in B3 geldt $e = 0,1$.



Figuur D.3: Vergelijking waarnemingen en berekeningen wat betreft hoek van afsplitsing en sedimentverdeling voor Bulle voor

$\frac{S_s}{S_b} \in [0; 0,15]$. In B2 geldt $e = 0,0075$ en in B3 geldt $e = 0,1$.

Tabel D.3: Numerieke gegevens berekeningen Bulle.

nummer berekening		waarnemingen	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
$\frac{Q_s}{Q_b}$	α		$c = 1$	$c = 0,0075 \cdot 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = 0,2 \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{Q_s}{Q_b}}$
1,00	30°	0,04	0,56	0,04	0,11
1,07	60°	0,07	0,60	0,05	0,12
1,11	150°	0,09	0,62	0,06	0,13
1,13	120°	0,14	0,64	0,06	0,13
1,21	90°	0,10	0,69	0,08	0,14

D.3. Roosjen

In Tabel D.4 zijn de resultaten van de berekeningen voor de situatie van Roosjen (Roosjen & Zwanenburg [1995]) weergegeven.

Tabel D.4: Numerieke gegevens berekeningen Roosjen.

D.4a Numerieke gegevens berekeningen Roosjen voor $B_s = 0,60$ m en $B_b = 0,40$ m.

nummer berekening		waarnemingen	<i>Ro1</i>	<i>Ro2</i>	<i>Ro3</i>
$\frac{Q_s}{Q_b}$			$c = 1$	$c = 0,015 \cdot 10^{\frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = 0,5 \cdot \left(\frac{B_2}{B_1}\right) \cdot \left(\frac{Q_s}{Q_b}\right)^{\frac{Q_s}{Q_b}}$
0,68		0,16	0,68	0,05	0,38
1,10		0,61	1,10	0,21	0,56
1,46		1,00	1,46	0,64	0,87
1,47		0,78	1,47	0,65	0,88
1,49		0,90	1,49	0,70	0,91
1,49		1,12	1,49	0,70	0,91
1,53		1,00	1,53	0,77	0,95
1,55		1,19	1,55	0,82	0,98
1,66		1,32	1,66	1,14	1,16
1,68		1,46	1,68	1,21	1,20
1,78		1,74	1,78	1,61	1,40
1,83		1,88	1,83	1,85	1,51
1,92		1,78	1,92	2,43	1,76
1,97		2,67	1,97	2,76	1,90
2,00		3,32	2,00	2,96	1,98
2,05		9,27	2,05	3,47	2,19
2,07		7,20	2,07	3,68	2,27
2,38		6,91	2,38	8,64	3,96
2,68		6,72	2,68	19,23	7,02
2,80		4,25	2,80	26,79	9,01
3,14		15,06	3,14	65,50	18,28

D.4b
Numerieke
gegevens

berekeningen Roosjen voor $B_s = 0,80$ m en $B_b = 0,20$ m.

nummer berekening		waarnemingen	<i>Ro1</i>	<i>Ro2</i>	<i>Ro3</i>
$\frac{Q_s}{Q_b}$			$c = 1$	$c = 0,005 \cdot 10^{0,5 \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$	$c = 0,5 \cdot \left(0,5 \cdot \frac{Q_s}{Q_b}\right)^{0,5 \cdot \frac{Q_s}{Q_b}}$
1,73		0,14	1,73	0,06	0,44
1,79		0,16	1,79	0,07	0,45
2,75		1,42	2,75	0,33	0,78
3,02		0,68	3,02	0,49	0,93
3,10		1,05	3,10	0,55	0,98
3,17		0,82	3,17	0,61	0,33
3,37		1,26	3,37	0,81	1,04
3,45		1,05	3,45	0,91	1,20
3,86		1,57	3,86	1,65	1,28
4,34		2,18	4,34	3,19	1,78
5,32		0,76	5,32	12,21	2,68
5,38		3,67	5,38	13,24	6,77
5,42		3,55	5,42	13,82	7,19
5,49		4,85	5,49	15,31	7,2
6,09		17,14	6,09	33,66	8,01
6,32		14,75	6,32	45,71	14,80
7,47		14,13	7,47	202,97	18,98

E. WAARNEMINGEN UIT LITERATUUR

In deze bijlagen staan de waarnemingen uit de literatuur geordend die gebruikt zijn in dit afstudeeronderzoek. § E.1 bevat de waarnemingen uit laboratoriumexperimenten, § E.2 bevat de waarnemingen uit schaalmodellen.

E.1. Laboratoriumexperimenten

E.1.1. Bulle [1926]

Bij de meeste proeven van Bulle is de hoogte van de stuwen aan het einde van de hoofd- en nevengeul gelijk gehouden. De waterdiepte is aan de hoge kant gehouden, zodat er alleen bodemtransport optrad.

Tabel E.1: Waarnemingen door Bulle.

situatie	α [°]	Q_m [l/s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
situatieparameter				
water	30	5,00	1,00	nvt
	60	5,00	1,07	nvt
	90	5,00	1,21	nvt
	120	5,00	1,13	nvt
	150	5,00	1,11	nvt
water: afger. oevertknik	30	5,00	1,00	nvt
	60	5,00	1,02	nvt
water: $B_b = \frac{1}{2} \cdot B_s$, geen afvoercontrole	90	5,00	2,23	nvt
water: $B_b = \frac{1}{2} \cdot B_s$, afvoercontrole	90	5,00	1,00	nvt
sediment: afvoercontrole	30	5,00	1,63	0,08
		5,00	2,45	0,40
		4,65	4,17	2,35
sediment: $t = 45$ min.	30	5,00	1,00	0,03
	60	5,00	1,07	0,04
	90	5,00	1,21	0,10
	120	5,00	1,13	0,14
	150	5,00	1,11	0,09
sediment: $t = 75$ min.	30	5,00	1,00	0,05
	60	5,00	1,07	0,06
	90	5,00	1,21	0,09
sediment: $t = 45$ min., afger. oevertknik	30	5,00	1,00	0,03
	60	5,00	1,02	0,10
	90	4,89	1,12	0,11

water = alleen de waterbeweging is bekeken;

afvoercontrole = waterstand in geul is gemanipuleerd, zodat bepaalde debietverdeling plaatsvond;

sediment = zowel de water- als de sedimentbeweging is bekeken;

nvt = niet van toepassing

E.1.2. Riad [1961]

Bij de proeven van Riad is er gemanipuleerd met de hoogte van de stuwen aan het einde van de hoofd- en nevengeul. Op die manier is er variatie in de debietverdeling aangebracht.

Tabel E.2: Waarnemingen door Riad.

Q_m [l/s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
30,40	1,01	0,02
47,30	1,60	0,15
48,08	1,82	0,36
48,08	1,72	0,27
49,90	1,96	0,44
50,00	2,00	0,54
50,20	2,39	1,11
50,40	2,13	0,63
50,70	2,07	0,62
53,60	2,58	2,33
54,20	2,74	2,62
54,90	2,82	3,77
56,50	3,53	7,79
69,40	1,66	0,18
70,64	2,05	0,52

E.1.3. *Habermaas [1935]*

Een tekening van de proefopstellingen is weergegeven in Fig. A.1.

Tabel E.3: Waarnemingen door Habermaas

proefopstelling	1						2						3			5				
Q_m [l/s]	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	4,0	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	4,0	1,5	2,0	2,5	2,0	2,5	2,5	3,0	4,0
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	3,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	3,00	1,00	1,00	1,50	1,00	1,50	1,50	2,00	3,00
$\frac{S_s}{S_b}$	0,14	0,79	0,46	1,00	0,88	2,85	2,63	2,00	3,56	6,00	3,22	47,0	4,27	5,80	169	3,50	0,46	16,5	1,92	1,72

proefopstelling	6			7			8					9				10			
Q_m [l/s]	2,5	3,0	4,0	2,5	3,0	4,0	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	2,0	2,5	3,0	4,0	2,0	2,5	3,0	4,0
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,50	2,00	3,00	1,50	2,00	3,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00	3,00	1,00	1,50	2,00	3,00
$\frac{S_s}{S_b}$	0,37	1,00	1,10	16,0	0,27	0,17	2,50	3,44	11,0	17,0	79,0	5,86	35,7	149	67,0	4,75	7,40	2,50	7,50

proefopstelling	11				14					17				18		19			
Q_m [l/s]	1,5	2,0	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	2,0	2,5	2,5	3,0	1,5	2,0	1,5	2,0	2,5	2,5
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,00	1,00	1,50	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	1,00	1,50	1,50	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
$\frac{S_s}{S_b}$	0,69	1,14	3,83	5,60	1,25	2,40	3,63	4,80	15,5	2,09	5,73	8,17	112	28,0	86,5	3,50	4,67	75,0	81,5

proefopstelling	21					23					
Q_m [l/s]	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	1,5	2,0	2,5	2,5	3,0	4,0
$\frac{Q_s}{Q_b}$	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	3,00
$\frac{S_s}{S_b}$	5,60	15,7	9,00	72,3	41,0	2,30	9,42	3,36	69,0	7,00	22,2

E.1.4. Shafai-Bagestan [1999]

Tabel E.4: Waarnemingen door Shafai-Bagestan.

α [°]	Q_m [l/s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
15	27,70	3,62	233,33
	29,20	2,89	58,33
	29,90	2,65	75,00
	53,90	5,42	100,00
	54,00	5,00	75,00
	54,50	4,74	46,15
45	30,60	2,44	175,00
	31,70	2,17	58,33
	33,50	1,84	22,22
	56,20	4,02	81,82
	57,00	3,75	42,31
	57,50	3,60	36,36
60	30,90	2,36	70,00
	32,60	1,99	38,89
	34,70	1,67	28,57
	56,60	3,56	66,00
	56,60	3,56	58,93
	56,60	3,56	45,83
	57,20	3,40	44,59
	58,00	3,46	45,00
75	31,30	2,26	42,86
	32,70	1,97	23,08
	35,00	1,63	14,21
	40,30	2,91	60,00
	57,50	3,60	36,59
	57,80	3,52	30,43
	59,30	3,15	25,00
90	30,90	0,37	28,57
	31,80	0,33	17,65
	34,70	0,22	15,38
	54,20	0,52	30,61
	56,50	0,59	42,11
	58,80	0,51	20,00

E.1.5. Den Dekker & Voorthuizen[1994] en Roosjen & Zwanenburg [1995]

Tabel E.5: Waarnemingen door Roosjen & Zwanenburg.

B_s [m]	B_b [m]	Q_m [l/s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
0,60	0,40	10,15	3,14	15,06
		18,26	0,68	0,16
		18,30	2,00	3,32
		18,38	1,78	1,74
		18,42	1,49	0,90
		18,55	1,10	0,61
		18,64	2,80	4,25
		18,73	2,68	6,72
		28,31	1,97	2,67
		30,22	1,53	1,00
		30,37	2,05	9,27
		31,53	2,38	6,91
		31,61	1,55	1,19
		31,71	1,49	1,12
		31,88	1,46	1,00
		38,31	1,92	1,78
		38,42	1,47	0,78
		38,44	1,66	1,32
		38,56	1,68	1,46
		38,60	2,07	7,20
38,65	1,83	1,88		
0,80	0,20	19,60	2,75	1,42
		19,60	3,86	1,57
		20,11	3,10	1,05
		27,95	1,73	0,14
		28,28	5,38	3,67
		28,33	3,17	0,82
		28,35	6,09	17,14
		28,39	5,32	0,76
		28,46	7,47	14,13
		28,55	6,32	14,75
		28,82	3,45	1,05
		36,21	3,37	1,26
		38,12	1,79	0,16
		38,17	3,02	0,68
		38,31	4,34	2,18
		38,50	5,49	4,85
		38,75	5,42	3,55

E.2. Schaalmodellen

E.2.1. Pannerdensche Kop (Van der Zwaard [1981])

Tabel E.6: Waarnemingen in schaalmodel Pannerdensche Kop.

Q_m [m ³ /s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
1.500	1,38	0,61
	1,41	0,85
	1,74	1,94
	2,35	2,46
	2,35	2,75
	2,35	3,77
	4,03	9,12
2.100	1,66	1,42
	1,91	1,98
	2,24	2,79
	2,24	3,00
	2,78	4,41
2.300	3,29	6,89
	1,96	2,54
	2,22	2,85
	2,23	3,36
	2,48	3,22
	2,71	4,72

E.2.2. IJsselkop (De Vries & Van de Werf [1969])

Tabel E.7: Waarnemingen in schaalmodel IJsselkop.

stuwprogramma [m ³ /s]	Q_m [m ³ /s]	$\frac{Q_s}{Q_b}$	$\frac{S_s}{S_b}$
250	300	0,20	1,67
	574	1,30	1,67
	755	1,55	1,67
	884	1,75	1,67
300	630	1,10	0,54
	817	1,66	0,54
350	703	1,01	0,73
	703	1,01	1,20
	708	1,02	1,44
	1010	1,67	0,73
	1010	1,67	1,20
400	1049	1,77	1,44
	737	0,84	0,58
	1050	1,35	0,58

F. UITKLAPVEL PLATTEGROND VAN EN STROOMBEELD BIJ EEN SPLITSINGSPUNT

