

Morfologische ontwikkelingen in sedimenterende nevengeulen: ontwerpparameters & sedimentbeheersende maatregelen



E.R. Klop

Juni 2009

Morfologische ontwikkelingen in sedimenterende nevengeulen: ontwerpparameters & sedimentbeheersende maatregelen

Juni 2009

E.R. Klop

Afstudeercommissie:

Ir. G.J. (Gert Jan) Akkerman M.Sc. (Royal Haskoning)

Dr. R.M.J. (Ralph) Schielen (Universiteit Twente / Rijkswaterstaat Waterdienst)

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

Ir. H. (Hendrik) Havinga (Rijkswaterstaat Oost-Nederland)

Universiteit Twente

Faculteit Construerende Technische Wetenschappen

Sectie: Water Engineering and Management

Royal Haskoning

Voorwoord

Ongeveer een jaar geleden is mijn laatste fase van mijn universitaire studie aan de Universiteit Twente ingegaan, en wel in vorm van een wetenschappelijk onderzoek. De keuze van het onderwerp is niet zo moeilijk geweest. Vanuit mijn vooropleiding Larenstein te Velp met specialisatie watersysteemanalyse, is mijn interesse voor de rivieren reeds gewekt en dat heb ik op de universiteit nog eens met meer wetenschappelijke diepgang kunnen uitwerken, o.a. in deze afstudeeropdracht: “Sedimenterende Nevengeulen: Ontwerpparameters en Sedimentbeheersende Maatregelen” bij Royal Haskoning te Nijmegen. Een combinatie vanuit de wens van Universiteit Twente voor wetenschappelijke verdieping en de behoefte van Royal Haskoning en Rijkswaterstaat voor een praktische oplossing voor sedimenterende nevengeulen. Daarnaast mijn eigen (sub)leerdoel om het modelleren mij eigen te maken. Het vooronderzoek, alsmede het onderzoek zelf, heeft vanwege deze combinatie veel tijd gevergd. Het is een lijvig rapport geworden, maar desalniettemin met interessante ontdekkingen en creatieve oplossingen.

Hierbij een dankwoord aan mijn vier begeleiders. In het bijzonder Ralph Schielen als dagelijkse begeleider van Universiteit Twente en de Waterdienst, die altijd maar weer geduldig heeft geluisterd naar de ups en downs van mijn onderzoeksresultaten, mij heeft geadviseerd, mij op mijn gemak heeft gesteld en mij moed heeft ingesproken om mijn onderzoek tot een goed einde te brengen. Ook wil natuurlijk Gert Jan Akkerman, mijn directe begeleider bij Royal Haskoning, hartelijk danken waarmee ik door zijn vele kennis en ervaring vele discussies heb kunnen voeren, die ik in mijn onderzoek heb kunnen verwerken. Jan Ribberink, mijn universitaire afstudeerdocent, die mij geholpen heeft met zijn enthousiasme en wetenschappelijke inzichten, maar vooral mij heeft gesteund bij de analytische analyse. Ook Hendrik Havinga, mijn indirecte begeleider bij Rijkswaterstaat Oost-Nederland, die mij heeft gesteund bij de praktische inzichten in creatieve maatregelen.

Last but not Least wil ik mijn vriendin Lieve Knarren en mijn ouders bedanken, voor hun steun en toeverlaat in al mijn onzekerheden, die altijd in mij hebben geloofd dat ik met succes zal afstuderen, en hen wil ik ook bedanken voor de hulp om dit onderzoek op schrift te stellen.

Enschede, 19 juni 2009

Samenvatting

In de afgelopen twee decennia zijn in de Rijntakken negen meestromende nevengeulen aangelegd, om de uiterwaarden een meer natuurlijk aanzien te geven. In de toekomst volgen nog vele nevengeulen in het kader van het programma Ruimte voor de Rivier (RvdR). Echter over de duurzaamheid van deze maatregelen bestaat nog veel discussie, doordat condities veranderen als gevolg van ecologische en morfologische processen (Duel, Baptist & Penning, 2001). Zowel door vegetatie als door morfologische ontwikkelingen neemt de afvoercapaciteit van de nevengeul af. Om de afvoercapaciteit van nevengeulen en andere RvdR maatregelen op peil te houden is er voor de toekomst een nieuwe mogelijke strategie ontwikkeld genaamd 'cyclisch beheer' (Duel, Baptist & Penning, 2001). Hiermee kan vegetatie op gezette tijden van 20 á 30 jaar verjongd worden en kan er eventueel grootschalig onderhoud aan nevengeulen verricht worden. De verwachting is dat nevengeulen, die meer dan 180 dagen per jaar meestromen, binnen 5 á 15 jaar volledig dicht kunnen sedimenteren (Mosselman, 2001). Uit het oogpunt van veiligheid zal in deze nevengeulen eerder onderhoud nodig zijn dan dat dit onderhoud gecombineerd kan worden met cyclisch beheer, waardoor een conflict ontstaat tussen ecologische en veiligheidsdoelstellingen in de nevengeul. Het doel van dit onderzoek richt zich dan ook op de mate waarin nevengeulen kunnen (dicht) sedimenteren en in hoeverre en met welke (tijdelijke) maatregelen de morfologische ontwikkeling vertraagd kan worden.

Om meer inzicht te krijgen in de morfologische ontwikkelingen van sedimenterende nevengeulen, worden in dit onderzoek de resultaten gepresenteerd in vorm van een fictieve nevengeul in de Waal, die in geometrie representatief gesteld kan worden aan de nevengeulen die huidig worden aangelegd in de Rijntakken. De eerste stap van het onderzoek bestaat uit een literatuurstudie naar processen, die de sedimentverdeling bepalen in het watersysteem op het splitsingspunt tussen de hoofd- en nevengeul. Ook is een evaluatie gedaan naar morfologische monitoring van bestaande nevengeulen. Vervolgens is in een analytisch model een evenwichtsanalyse en een stabiliteitsanalyse uitgevoerd, waarmee alleen bepaald kan worden in hoeverre het watersysteem (hoofd- en nevengeul) zich morfologisch kan ontwikkelen op lange termijn bij verschillende ongelijke sedimentverdelingen en door de geometrieparameters van de nevengeul. Om meer inzicht te krijgen in hoe deze morfologische ontwikkelingen op korte termijn verlopen en op welke tijdschaal de lange termijn ontwikkelingen bereikt worden is de fictieve nevengeul ook in het numerieke 1D Rijntakken model geschematiseerd.

Van de negen meestromende nevengeulen die in de Rijntakken zijn er slechts vijf morfologisch gemonitord, waarbij alleen in de drie nevengeulen van Gameren in de Waal aanzienlijke sedimentatie is opgetreden. Er treedt in een nevengeul alleen sedimentatie op, wanneer het sedimentaanbod groter is dan de transportcapaciteit. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen afvoercondities die lager of hoger zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed. Tijdens lage afvoercondities onttrekt de nevengeul in een bepaalde verhouding hoeveelheid water en sediment aan de rivier, waardoor er een afvoer- en sedimentverdeling ontstaat. De verhouding tussen deze verdelingen bepaalt hoofdzakelijk de morfologische ontwikkeling van het riviersysteem. Hierbij kan juist het grove sediment, dat via bodemtransport wordt getransporteerd, ongelijk worden verdeeld naar de afvoerverdeling. Dit ten gevolge van spiraalstroming, dwarshellingen en bodemvormen, die de stroming en het transport van sediment bij de bodem sterk kunnen beïnvloeden. Tijdens afvoercondities, die hoger zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed, speelt de afvoer- en sedimentverdeling op het splitsingspunt een kleinere rol. Hierbij wordt de transportcapaciteit van de nevengeul beïnvloed door de gemiddelde hoek, die nevengeul maakt ten opzichte van de uiterwaardstroming. Het sedimentaanbod naar de nevengeul wordt beïnvloed door oeverwalafzettingen processen.

Om de sedimentverdeling te kunnen beschrijven in het watersysteem is in dit onderzoek een splitsingspuntrelatie gebruikt, waarbij de sedimentverdeling afhankelijk is van de afvoerverdeling in relatie tot een macht van parameter 'Y'. In deze relatie neemt het sediment naar de nevengeul af (resp. toe), wanneer parameter Y groter (resp. kleiner) wordt. Het sedimenttransport dat door de Waal wordt getransporteerd kan worden benaderd aan de hand van een 'power-law' vergelijking. Hierbij is het sedimenttransport afhankelijk van de stroomsnelheid tot een macht van parameter 'n', die vervolgens allebei afhankelijk zijn van de afvoer in het watersysteem. Met deze parameters kunnen de lange termijn ontwikkelingen van het watersysteem, zoals deze gevonden zijn met de evenwichtsanalyse en de stabiliteitsanalyse, in twee regimes onderscheiden worden. De overgang tussen deze regimes wordt gevormd wanneer $Y_{crit} = n/3$.

In situaties waarbij $Y > n/3$ ontstaan relatief kleine evenwichtsdieptes in de nevengeul, waarbij wel of niet sedimentatie kan ontstaan afhankelijk van de (aanleg)bodemligging. Ondanks waterdiepteverstoringen, bijvoorbeeld als gevolg van (kleine) verschillen in de afvoer en sedimentverhoudingen in de tijd, leiden deze situaties altijd tot stabiele evenwichtssituaties. In deze situaties zullen de waterdiepteverstoringen hersteld worden, waardoor het watersysteem altijd zal terugkeren naar zijn oorspronkelijke evenwichtsdiepte. Dit in tegenstelling tot instabiele evenwichtssituaties die gevormd wanneer $Y < n/3$. In deze situaties worden waterdiepteverstoringen niet hersteld maar worden juist altijd versterkt. Dit betekent dat de evenwichtsdiepteverhoudingen in het watersysteem in zijn geheel niet bereikt worden, waarbij de hoofdgeul altijd zal eroderen, totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is.

Deze regimes tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties met de bijhorende morfologische verschijnselen doen zich ook voor in het numerieke Rijntakken model, waarbij Y_{crit} gelijk is aan 1,1. Hierbij is het watersysteem doorgerekend met een 80 jarige hydrograaf. Hierbij leidde instabiele situaties ($Y < 1,1$) altijd tot volledige sedimentatie van de nevengeul binnen een termijn van 10 jaar. Omdat bestaande nevengeulen nog steeds niet dicht gesedimenteerd zijn, wordt blijkbaar tot op heden de sedimentinstroom voldoende gereduceerd door de wijze waarop deze nevengeulen zijn aangelegd. In situaties waarbij $Y > 1,1$ worden stabiele evenwichtssituaties gevormd, waarbij binnen een periode van 80 jaar al dan niet een evenwichtsdiepte wordt benaderd. Zeer kleine evenwichtsdieptes in de nevengeul zullen niet bereikt worden, omdat de nevengeul zichzelf afknijpt van de rivier. Dit als gevolg van een bovenstrooms sedimentatiefront dat zich in de tijd stroomafwaarts beweegt en in hoogte toeneemt. Rivierbeheerders kunnen vervolgens bij situaties waarbij $1,1 < Y \leq 1,8$ een onderhoudstermijn verwachten van 6 á 70 jaar, wanneer er vanuit het oogpunt van veiligheid moet worden ingegrepen zodra 10 procent van het doorstroom oppervlak bovenstrooms van de nevengeul dicht gesedimenteerd is.

De morfologische ontwikkeling van een nevengeul kan beïnvloed worden door de evenwichtsdiepte tijdelijk of permanent te vergroten, door de instroom van het sediment naar de nevengeul te reduceren en/of de transportcapaciteit van de nevengeul te verhogen. Dit laatste kan gedaan worden door het debiet naar de nevengeul te vergroten of door het dwarsprofiel van de nevengeul te verkleinen. Op basis van deze (uitgangspunten) zijn er sedimentbeheersende maatregelen ontwikkeld, uiteenlopend van sedimentreducerende, dwarsprofiel- en debietregulerende maatregelen.

Dwarsprofiel regulerende maatregelen zijn tijdelijke maatregelen, zoals schanskorven of caissons, die het dwarsprofiel van de nevengeul verkleinen. Echter als gevolg van een hogere stromingsweerstand wordt het debiet naar de nevengeul gereduceerd waardoor, naast lokale erosie, sedimentatie in de nevengeul wordt versterkt.

Debietregulerende maatregelen zijn permanente maatregelen die in de hoofdgeul worden toegepast, waarmee door middel van een (lokale) waterpeilverhoging, het debiet naar de nevengeul kan worden vergroot. Naast de vergroting van het debiet, zal het sedimenttransport naar de nevengeul ook toenemen. Dit laatste zal bij het aanleggen van een langsdam minder sterk zijn dan bij een bodemdrempel of bij een dwarsprofielversmalling in de hoofdgeul, doordat het water naar de langseul minder sterk hoeft te worden afgebogen. Een situatie met of een situatie zonder een waterpeilverhoging van 0,05 tot 0,25 meter, gedurende een periode van 8 jaar, resulteert in bovenstrooms bodempeilverschil van 1,3 meter. Onzeker blijft of de daadwerkelijke sedimentverdeling op deze manier goed gesimuleerd wordt en of deze waterpeilverhogingen (continu) bereikt kunnen worden met een langsdam. Het debiet naar de nevengeul kan ook tijdelijk gereguleerd worden door middel van pompen, door de nevengeul bovenstrooms af te sluiten met een constructie. Baggerpompen kunnen als tijdelijke maatregelen al vanaf een capaciteit van $10 \text{ m}^3/\text{s}$ erosie in de nevengeul realiseren. Echter een pompcapaciteit van meer dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kan slechts bereikt worden met pompen die doorgaans op baggerschuiten of in gemalen worden toegepast, waarvan de investeringskosten hoog zullen zijn, niet energiezuinig en derhalve niet haalbaar kunnen zijn.

Sedimentreducerende maatregelen zijn tijdelijke of permanente maatregelen die bovenstrooms (kribvak en of kribkop) in de nevengeul worden toegepast om het sediment naar dat naar de nevengeul wordt getransporteerd, te reduceren. Uit dit onderzoek blijken deze maatregelen effectiever te zijn wanneer deze maatregelen permanent worden toegepast, vanaf het begin van aanleg werkzaam zijn en daardoor de ontwikkeling van de nevengeul vertragen. Op deze manier kan de morfologische ontwikkeling in een sedimenterende nevengeul, waarbij gemiddeld $0,08 \text{ m/j}$ sedimentatie optreedt, met 5 tot 80 jaar vertraagd

worden indien de sedimentinstroom met circa 40 á 80 procent kan worden gereduceerd. Vanwege deze positieve uitkomsten is het zinvol om nader onderzoek te doen in 3D model studies, om te bepalen of deze potentiële reducties in het sediment ook daadwerkelijk behaald kunnen worden met luifelconstructies, bodemschermen of drijvende schermen (bandall's).

Naast bovenstaande constructieve maatregelen, kan de oplossing ook gezocht worden in het ontwerp van de nevengeul (C_2 , B_2 en L_2). Bij de huidige ontwerpaanpak wordt de bodemligging van de nevengeul bepaald op hydraulische en ecologische gronden. Op deze manier wordt het sedimenteren of eroderen van de nevengeul al indirect opgelegd wanneer deze, bij een zekere afvoer- en sedimentverdeling, van zijn evenwichtsdiepte wordt aangelegd. Door middel van de morfologische ‘neutrale’ ontwerprichtlijnen kan de evenwichtsdiepte zo aangepast worden, wanneer de sedimentverdeling na enige tijd bekend is, dat deze diepte min of meer overeenkomt met de gewenste bodemligging. Hiermee kan het beheer en onderhoud van sedimenterende nevengeulen uit het oogpunt van veiligheid, door middel van andere sedimentbeheersende maatregelen, gereduceerd of misschien zelfs wel voorkomen worden. Bovendien kunnen hogere stroomsnelheden worden toegelaten, waardoor de nevengeul in horizontale zin morfologisch actief (of actiever) kan zijn.

In stabiele evenwichtssituaties waarbij $Y > n/3$ kan een lager evenwichtsbodempeil, gerelateerd aan een grotere evenwichtsdiepte, verkregen worden door:

- de lengte van de nevengeul te verkleinen (groter verhang);
- de stromingsweerstand van de nevengeul te vergroten.

Merk op dat deze ‘neutrale’ ontwerpprincipes alleen kunnen worden toegepast in stabiele evenwichtssituaties.

Doordat het onzeker is in hoeverre sedimenterende nevengeulen verwijderd zijn van een instabiele situatie, wordt aanbevolen om eerst meer monitoring uit te voeren bij solitair sedimenterende nevengeulen. Wanneer hieruit blijkt dat een nevengeul zich in of nabij een instabiele situatie bevindt, wordt er aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de daadwerkelijke sedimentreductie van sedimentreducerende maatregelen zoals luifelconstructies, bodemschermen en drijvende schermen (bandall's). Wanneer blijkt dat de sedimentinstroom zich relatief ver van een instabiele situatie bevindt, wordt er aanbevolen om nevengeulen aan te leggen volgens de neutrale morfologische ontwerprichtlijnen.

Begrippenlijst

Afvoer- en sedimentverdeling: Verhouding tussen de afvoer (Q_1/Q_2) en sediment (Q_{s1in}/Q_{s2in}) op het splitsingspunt tussen de hoofdgeul en nevengeul.

Cyclisch beheer: nieuwe beheersvorm die ontwikkeld is voor natuurgebieden om te blijven voldoen aan de veiligheidsnorm en tegelijkertijd een gevarieerde ontwikkeling van natuur mogelijk te maken. Het is een beheersvorm die zoveel mogelijk aansluiting zoekt bij natuurlijke processen, binnen het huidige rivierbeheer om pioniervegetaties in een cyclus terug te brengen (Cyclisch beheer in uiterwaarden: Natuur en veiligheid in de praktijk, 2006).

Ecologische kwaliteit: overkoepelend begrip die de volgende factoren benadrukt, geciteerd in Molenaar (2005):

- De natuurlijkheid van de abiotische omstandigheden;
- de volledigheid aan karakteristieke ontwikkelingsstadia;
- de aanwezigheid van kenmerkende soorten (groepen).

Evenwichtsdiepte: een diepte van de waterloop bij een constante afvoer waarbij de in- en uitstroom van sediment in een kanaal aan elkaar gelijk is.

Instabiel evenwicht: is een evenwichtssituatie bij een splitsingspunt waarbij 1 kanaal erodeert totdat het andere kanaal volledig dicht gesedimenteerd is.

Langsdam: een in de stromingsrichting geplaatste dam in de rivier die kribben met elkaar kan verbinden zodat een voorkanaal ontstaat bij de instroomopening van een nevengeul.

Lengte verhouding: verhouding tussen de lengte van de nevengeul (L_2) met de lengte van de hoofdgeul (L_1) tussen de in- en uitstroomopening van de nevengeul.

Maatgevende afvoer: maximale afvoer die een rivier veilig moet transporteren zonder dat er een overstroming ontstaat.

Morfologisch (in)actief: situatie in de nevengeul waarbij de sedimentinstroom naar de nevengeul zoveel mogelijk wordt gereduceerd. Dit om sedimentatie in de nevengeul zoveel mogelijk te vertragen.

Morfologisch neutraal: situatie in de nevengeul waarbij de nevengeul zo goed mogelijk op evenwichtsdiepte wordt aangelegd waardoor de sedimentinstroom min of meer gelijk is aan de sedimenttransportcapaciteit.

Nevengeul: een parallel ongelijkwaardig aan de hoofdstroom gelegen geul waarin het water tijdens een groot deel van het jaar mee stroomt die zowel een veiligheid als een ecologische doelstelling heeft.

Ongelijkwaardige aantakking: een aftakking (nevengeul) waarbij het instroompeil van de instroomopening veel hoger ligt dan het bodempeil van de rivier.

Ruimtelijke kwaliteit: kernbegrip in het kader Ruimte voor de Rivier om een leefgebied mooier en leefbaarder te maken. De ruimtelijke kwaliteit speelt bij nevengeulen een belangrijke rol in vorm van de ecologische kwaliteit. De ruimtelijke kwaliteit kan worden opgesplitst in: a) vergroting van de ruimtelijke diversiteit tussen de riviertakken, b) handhaving en versterking van het open karakter van het rivierengebied met de karakteristieke waterfronten, c) behoud en ontwikkeling van de landschappelijke, ecologische, aardkundige en cultuurhistorische waarden en de verbetering van de milieukwaliteit, d) versterking van de mogelijkheden van het gebruik van hoofdvaarwegen door beroeps- en pleziervaart.

Sedimentbeheersende maatregel (SBM): een maatregel of een constructie die tijdelijk kan worden toegepast bij sedimenterende nevengeulen nadat een bepaalde hoeveelheid sediment in een nevengeul is afgezet (voorlopige definitie).

Sedimentatiefront: Een opeenhoping van sedimentatie in een nevengeul dat in de tijd in hoogte toeneemt en zich stroomafwaarts verplaatst.

Sedimentvang: Is een verbreding en verdieping van een nevengeul die sediment (bovenstrooms) afvangt in de nevengeul.

Splitsingspuntrelatie: beschrijft de distributie van sediment bij splitsingspunten zoals bij een rivier met een nevengeul.

Stabiel evenwicht: is een evenwichtssituatie bij een splitsingspunt waarnaar het watersysteem altijd naar terugkeert ongeacht de waterdiepteverstoringen.

Veiligheidsnorm: norm voor een afvoer die één keer per tijdseenheid gemiddeld tot een overstroming mag leiden.

Volledige sedimentatie: een toestand waarin de nevengeul zijn watervoerendheid heeft verloren als gevolg van een sedimentatiefront, waarbij het bodempeil veelal hoger ligt dan het waterpeil.

Watersysteem: een ruimtelijke eenheid waarbij de moedergeul (rivier) zich opsplijt in een hoofdgeul en een nevengeul.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	3
Samenvatting.....	4
Begrippenlijst.....	7
Inhoudsopgave	9
Lijst van Symbolen	11
1 Inleiding	12
2 Probleemanalyse.....	13
2.1 Doelstelling en vraagstelling van het onderzoek	14
3 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: processen & monitoring.....	15
3.1 Wat zijn nevengeulen.....	15
3.2 Huidige en toekomstige nevengeulen in Nederland.....	16
3.3 Beschrijving van de Rijn en de Waal (sediment en hydraulica)	16
3.4 Morfologisch evenwicht van aftakkingen en bijhorende processen.....	17
3.5 Morfologische evaluatie bestaande nevengeulen	25
4 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: evenwichtsmorfologie.....	30
4.1 Doel en aanpak.....	30
4.2 Definitie en parametrisatie van evenwichtsmorfologie	31
4.3 Analytische parametrisatie van het watersysteem.....	31
4.4 Expliciete analytische oplossing van het watersysteem.....	32
4.5 Fitting procedure	33
4.6 Keuze en gebruikte splitsingspuntrelatie in het SOBEK-RE model.....	37
5 Stabiliteit & evenwichtsituaties in het watersysteem versus parameter 'Y'	39
5.1 Stabiliteit analyse Wang et al (1995)	39
5.2 Beschrijving Standaardcase	40
5.3 Analytische evenwichtsituaties van het beschreven watersysteem	41
5.4 Interpretatie gevonden analytische evenwichtssituaties in relatie met stabiliteitsanalyse.....	43
5.5 Morfologische stabiliteit: Splitsingspuntrelatie Kleinhans (2008)	46
5.6 Invloeden van de nevengeulparameters 'L ₂ ', 'C ₂ ' en 'B ₂ ' op evenwichtsmorfologie.....	47
5.7 Conclusies analytische resultaten.....	52
6 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: Rijntakken model	54
6.1 SOBEK-RE model.....	54
6.2 Geometrie en ligging van de SOBEK nevengeul versus hydraulica	59
7 Morfologische ontwikkelingen en tijdschalen van het watersysteem	63
7.1 Morfologische ontwikkelingen in watersysteem bij een stationaire afvoer	63
7.2 Morfologische ontwikkelingen met SOBEK nevengeul met een hydrograaf.....	66
7.3 Interventiemoment vanuit veiligheid versus onderhoudstermijnen aan nevengeulen.....	69
7.4 Conclusies morfologische ontwikkelingen in nevengeulen	71
8 Ontwikkelen sedimentbeheersende maatregelen.....	72
8.1 Onderscheiden van verschillende typen sedimentbeheersende maatregelen	72
8.2 Sedimentreducerende maatregelen.....	73
8.3 Debietregulerende maatregelen	76
8.4 Dwarsprofielregulerende maatregelen.....	79
9 Sedimentbeheersende maatregelen en hun effecten.....	81
9.1 Casestudie: toepassing van de sedimentbeheersende maatregelen.....	81
9.2 Sedimentreducerende maatregelen en hun effecten.....	82

9.3	Debietregulerende maatregelen en hun effecten	87
9.4	Dwarsprofielregulerende maatregelen en hun effecten.....	92
9.5	Morfologisch ‘neutraal’ ontwerpen in nevengeulen in verband met evenwichtsdiepte	94
10	Conclusies en aanbevelingen.....	101
10.1	Conclusies.....	101
10.2	Aanbevelingen	105
Referenties		107
Appendix A: Overzichtlijst RvdR maatregelen		109
Appendix B: Tijdschaal cyclisch beheer		110
Appendix C: Overzichtlijst Toekomstige Nevengeulen.....		111
Appendix D: Afvoer- en sedimentkarakteristieken Rijn en Waal		114
Appendix E: Schematisatie Bulle Effect		115
Appendix F: Definities parameters Mosselman (2001)		116
Appendix G: Ontwerpprincipes nevengeulen versus rivierfuncties		117
Appendix H: Volume verandering nevengeulen van Gameren		119
Appendix I: Afleiding morfologische evenwichtrelaties (11), (12) en (13).....		120
Appendix J: Omschrijven Sediment transportformule SOBEK		122
Appendix K: Stabiliteit watersysteem bij identieke en niet identieke kanalen		125
Appendix L: Transport naar hoofd- en nevengeul van totaal sedimenttransport		130
Appendix M: Beschikbare splitsingspuntrelaties in SOBEK.....		131
Appendix N: Hydraulische gegevens SOBEK nevengeul versus Waalafvoer		132
Appendix O: Validatie Nieuw Model		133
Appendix P: Variatie in de geometrie parameters.....		135
Appendix Q: Profielen voor gevoeligheid geometrie-parameters.....		137
Appendix R: Waarden bij berekening evenwichtsdieptes bij (L_2).....		138
Appendix S: invloeden van parameters C_2 en B_2 op evenwichtssituaties.....		140
Appendix T: Effecten sedimentreducerende maatregelen (analytisch)		144

Lijst van Symbolen

Index $i = 0$ (moedergeul) ; 1 (hoofdgeul) ; 2 (nevengeul)

Q_i = debiet van kanaal [m^3/s]

Q_{sini} = sedimentaanbod naar kanaal [m^3/s]

Q_{si} = transportcapaciteit van kanaal [m^3/s]

B_i = breedte van kanaal [m]

B_{si} = sediment transporterende breedte van kanaal [m]

h_i = waterdiepte kanaal [m]

R_i = hydraulische straal [m]

ib_i = verhang kanaal [m]

C_i = Chezy coëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

u_i = stroomsnelheid kanaal [m/s]

he_i = evenwichtsdiepte [m]

ib_i = evenwichtsverhang [-]

L_i = lengte van kanaal [m]

ε = porositeit sediment [-]

z_b = bodempeil [m+NAP]

S = sedimenttransport [m^3/s]

m = coëfficiënt in sediment transportformule (power-law) [m]

n = macht in sediment transportformule (power-law) [-]

F = sediment verhoudingsfactor [-]

X = vermenigvuldigingsfactor op de sedimentverdeling [-]

Y = macht op de sedimentverdeling [-]

γ_1 = calibratie coëfficiënt sedimentverdeling splitsingspuntrelatie hoofdgeul [-]

γ_2 = calibratie coëfficiënt sedimentverdeling splitsingspuntrelatie nevengeul [-]

g = acceleratie door zwaartekracht [m/s^2]

Δ = relatieve dichtheid van het sediment [-]

D_{50} = korrelgrootte [m]

Φ = transport parameter [-]

θ_s = Shields parameter [-]

θ_c = kritieke Shields parameter [-]

A = correctie factor in 'User-Defined' transportformule [-]

μ = ripple factor [-]

β_u = coëfficiënt in 'User-Defined' transportformule [-]

α_u = coëfficiënt in 'User-Defined' transportformule [-]

a = coëfficiënt fitting procedure

b = coëfficiënt fitting procedure

u_{fit} = stroomsnelheid bij 'fitting=procedure' [m/s]

α_i = bifurcatiehoek [rad]

1 Inleiding

De grootschalige regulering van de Nederlandse rivieren in de afgelopen eeuwen heeft het landschap sterk veranderd. Rivieren zijn sterk genormaliseerd en over grote delen zijn de rivieren bedijkt, waardoor rivieren een beperkte ruimte hebben om vrij te stromen. Deze veranderingen in combinatie met klimaatverandering resulteren in grotere piekafvoeren en hogere waterstanden in de Nederlandse Rivieren Rijn en Maas (Deltacommissie, 2008). Aangezien de veiligheidsnormen voorsnag gehandhaafd blijven, zoals opgenomen in de Wet op de Waterkering, moeten er maatregelen genomen worden om te kunnen blijven voldoen aan de huidige veiligheidseisen.

Als gevolg van deze tendens is het programma Ruimte voor de Rivier (RvdR) ontwikkeld voor de Rijnakken, waarbij maatregelen zoals dijkverhogingen vervangen worden door grootschalige rivierverruimende maatregelen. In de RvdR wordt de veiligheid getoetst aan de maatgevende afvoer, dit is de maximale afvoer die een rivier veilig moet transporteren zonder dat er een overstroming ontstaat. Het programma RvdR is verder opgedeeld in een korte en een lange termijn doelstelling. In het jaar 2015 moeten de Rijnakken een maatgevende rivierafvoer van 16.000 m³/s veilig kunnen afvoeren, die in Nederland via Lobith binnen kan stromen. Dit is de maatgevende afvoer die hoort bij een veiligheidsnorm van 1/1250 jaar (RIZA, 2001). In het jaar 2050 moeten de Rijnakken een maatgevende afvoer van 18.000 m³/s veilig kunnen afvoeren (Deltacommissie, 2008). Wanneer blijkt dat de maatgevende afvoer te hoge waterstanden geeft in de Rijnakken kunnen extra rivierverruimende maatregelen in de uiterwaarden worden toegepast, waarmee de afvoercapaciteit van de rivier vergroot kan worden. Dit resulteert weer in een verlaging van te hoge waterstanden in de Rijnakken. Een overzicht van RvdR maatregelen is weergegeven in figuur 3 in appendix A. Naast de veiligheid heeft de RvdR een nevendoelelstelling om een bijdrage te leveren aan het verbeteren van de ruimtelijke kwaliteit (zie begrippenlijst) in het rivierengebied zoals beschreven in de Planologische Kern Beslissing (PKB) deel 4 (2007).

Een nevengeul is een goed voorbeeld van een rivierverruimende maatregel binnen het kader van RvdR, die steeds meer wordt toegepast in de uiterwaarden en waarbij de doelstellingsfuncties veiligheid en ruimtelijke kwaliteit gecombineerd kunnen worden. Juist in nevengeulen, die een groot deel van het jaar meestromen, speelt de ecologische ontwikkeling en natuurherstel een belangrijke rol met betrekking tot de ruimtelijke kwaliteit. Echter over de duurzaamheid van deze maatregelen bestaat veel discussie doordat condities veranderen als gevolg van ecologische en morfologische processen (Duel, Baptist & Penning, 2001). Door vegetatieontwikkeling neemt de afvoercapaciteit van de nevengeul af als gevolg van een verhoging van de stromingsweerstand. Ook door veranderingen in de waterbeweging kan de morfologische ontwikkeling van het riviersysteem sterk worden beïnvloed. Dit kan leiden tot (sterke) sedimentatie van de nevengeul waardoor de afvoercapaciteit van de nevengeul in de tijd nog sneller zal afnemen. Om de afvoercapaciteit van nevengeulen en andere RvdR maatregelen op peil te houden is er een nieuwe mogelijke strategie ontwikkeld genaamd 'cyclisch beheer'. Met deze strategie kan op gezette tijden vegetatie in de uiterwaarden teruggezet worden naar pionier stadia, waarbij tegelijkertijd (grootschalig) onderhoud aan de morfologische ontwikkeling van de nevengeul verricht kan worden. Door vegetatie terug te zetten naar pionier of successie stadia kan de ecologische kwaliteit verhoogd worden, terwijl tegelijkertijd aan de veiligheidseis kan worden voldaan.

De termijn waarop verjonging van vegetatie gewenst is, moet voor elk riviertraject apart bepaald worden en is afhankelijk van de successiesnelheid en de ontwikkelingstijd waarop deze de climax stadia bereiken. De meeste ecotoop typen hebben minimaal een termijn van 20 á 30 jaar nodig voordat deze een climax stadium bereiken (Duel, Baptist & Penning, 2001). Afhankelijk van de vegetatie en morfologische ontwikkeling in nevengeulen kunnen ingrepen vanuit veiligheidsoverwegingen nog steeds eerder noodzakelijk zijn dan de termijn voor cyclisch beheer. In dit onderzoek wordt verondersteld dat de stromingsweerstand in relatie met vegetatieontwikkeling geen conflict vormt met cyclisch beheer als gevolg van natuurlijke begrazing. Om deze reden valt de vegetatieontwikkeling buiten het kader van dit onderzoek. Niettemin kan de benodigde afvoercapaciteit van de nevengeul nog steeds te snel afnemen als gevolg van (sterke) sedimentatie in de nevengeul, zie appendix B. Daarom beperkt dit onderzoek zich tot de mate waarin nevengeulen kunnen (dicht) sedimenteren en in hoeverre en met welke (tijdelijke) maatregelen de morfologische ontwikkeling eventueel vertraagd kan worden.

2 Probleemanalyse

Een nevengeul onttrekt in een bepaalde verhouding een hoeveelheid water en sediment aan een rivier. Deze verhouding heeft een grote invloed op de verdere morfologische ontwikkeling van het riviersysteem (rivier en nevengeul), waardoor het essentieel is om telkens de juiste verhouding te bereiken. In tegenstelling tot de afvoerverdeling kan de sedimentverdeling nog niet goed bepaald en gereguleerd worden met gevolg dat rivierfuncties als veiligheid, scheepvaart en ecologie (sterk) kunnen worden beïnvloed. Enerzijds komt dit omdat de onderliggende processen hoe het sediment zich daadwerkelijk verdeelt tussen de rivier en de nevengeul nog onvolledig beschreven zijn. Anderzijds zijn de huidige nevengeulen nog maar recentelijk aangelegd, waardoor er relatief weinig praktijkervaring is opgedaan over de morfologische ontwikkelingen van deze nevengeulen.

Door de grote onzekerheid over de sedimentverdelingen op splitsingspunten worden nevengeulen ontworpen volgens de onderstaande ontwerprichtlijnen (Mosselman, 2001; Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren, 2008). Hiermee wordt erosie van nevengeulen en sterke sedimentatie in rivieren in eerste instantie zoveel mogelijk beperkt:

- indien voldoende vaardiepte aanwezig is (2,8 meter voor de Waal) wordt de richtlijn gehanteerd dat de afvoer naar de nevengeul niet groter mag zijn dan 3 procent van de totale afvoer tijdens geulvullende afvoercondities van het zomerbed. Met deze richtlijn is de verwachting dat de sedimentatie beperkt blijft tot globaal 20 cm in de hoofdgeul;
- de gemiddelde stroomsnelheid in de nevengeul ligt rond de 0,3 m/s tijdens geulvullende afvoercondities van het zomerbed, waardoor de morfologische activiteit in de nevengeul beperkt blijft;
- nevengeulen worden 50 á 100 meter van de winterdijk aangelegd, waardoor de kans op mechanische instabiliteit van de winterdijk zo klein mogelijk wordt gehouden.

Met bovenstaande ontwerprichtlijnen is de transportcapaciteit van sediment in een nevengeul relatief laag ten opzichte van de hoofdgeul waardoor al snel teveel sediment naar de nevengeul getransporteerd kan worden. Hierdoor is de algemene verwachting dat nevengeulen op korte termijn (volledig) dicht sedimenteren. Door Mosselman (2001) wordt verwacht dat dit kan gebeuren binnen een termijn van 5 á 15 jaar voor nevengeulen die meer dan 180 dagen per jaar meestromen. In de periode van 1994-2002 zijn er echter negen meestromende nevengeulen aangelegd in de Rijntakken, die tot op heden nog niet dicht gesedimenteerd zijn. Met andere woorden: er bestaat nog steeds veel onduidelijkheid over hoe snel en wanneer nevengeulen (dicht) sedimenteren en waar dit afhankelijk van is.

Naast meer inzicht in de morfologische ontwikkeling van nevengeulen, willen rivierbeheerders ook meer inzicht verkrijgen in hoeverre deze ontwikkelingen vertraagd kunnen worden aan de hand van (tijdelijke) sedimentbeheersende maatregelen. Het uitgangspunt is hierbij om de morfologische ontwikkeling van (sterk) sedimenterende nevengeulen parallel te laten verlopen aan de termijn van 20 á 30 jaar vanuit cyclisch beheer. Tot op heden zijn de mogelijke maatregelen beperkt tot het baggeren of het plaatsen van een sedimentvang bovenstrooms van een nevengeul. Het doel van een sedimentvang is het afvangen van sediment door de stroomsnelheid te verlagen. Dit wordt bereikt door een nevengeul lokaal te verbreden en te verdiepen. Hierdoor wordt de morfologische ontwikkeling van een nevengeul vertraagd totdat de sedimentvang dicht gesedimenteerd is. De oplossing heeft twee nadelen te weten de nevengeul wordt morfologisch inactief en uiteindelijk moet de sedimentvang weer worden uitgegraven. Het nadeel van baggeren op korte termijn is dat hierdoor de ecologische kwaliteit van de nevengeul voortijdig teniet wordt gedaan.

Vanwege bovengenoemde beperkingen wordt in dit onderzoek tevens gezocht naar nieuwe (tijdelijke) maatregelen die toegepast kunnen worden bij sedimenterende nevengeulen. Hierbij gaat de voorkeur naar die maatregelen waarbij enige morfologische activiteit in de nevengeul behouden blijft en waarbij er geen hinder optreedt voor de scheepvaart door het waarborgen van een minimale vaardiepte van 2,8 meter en een vaarbreedte van 170 meter voor de Waal (Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren, 2008, ; Ghimire, 2003).

2.1 Doelstelling en vraagstelling van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is om meer inzicht te verkrijgen in hoeverre ontwerpparameters van nevengeulen de morfologie beïnvloeden en in hoeverre de te ontwikkelen sedimentbeheersende maatregelen, binnen het kader van veiligheid, ecologie en scheepvaart, een bijdrage kunnen leveren aan het beheer en onderhoud van sedimenterende nevengeulen.

2.1.1 Vraagstellingen

- 1) Welke morfologische ontwikkelingen hebben zich tot nu toe voorgedaan in de huidige nevengeulen en hoe kunnen deze ontwikkelingen verklaard worden met achterliggende processen?
- 2) In hoeverre worden de morfologische evenwichtssituaties in het watersysteem beïnvloedt door verschillende sedimentverdelingen, in relatie met de ontwerpparameters van nevengeulen?
 - a. Welke splitsingspuntrelatie wordt gebruikt en hoe bepaalt deze relatie de sedimentverdeling?
 - b. Welke evenwichtssituaties doen zich voor in het watersysteem in relatie met verschillende sedimentverdelingen en geometrieparameters (lengte (L_2), stromingsweerstand (C_2) en breedte (B_2) van nevengeulen?
 - c. Welke evenwichtssituaties kunnen daadwerkelijk worden bereikt in de praktijk?
 - d. In welke nevengeulen kan sedimentatie verwacht worden?
- 3) Hoe verloopt de morfologische ontwikkeling van nevengeulen en in hoeverre en op welke termijn (tijdschaal) kunnen deze (dicht) sedimenteren en een conflict vormen met veiligheids en ecologische doelstellingen?
- 4) Welke sedimentbeheersende maatregelen (tijdelijk, permanent en ontwerptechnisch) kunnen naast sedimentvangen en baggeren worden ontwikkeld en toegepast bij sedimenterende nevengeulen?
- 5) In hoeverre leveren de sedimentbeheersende maatregelen (tijdelijk, permanent en ontwerptechnisch) een bijdrage aan het beheer en onderhoud van sedimenterende nevengeulen?

2.1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 3 volgt eerst een definitie van een nevengeul en is er een verkenning gedaan naar hoeveel nevengeulen zijn en worden aangelegd. Verder wordt beschreven welke morfologische ontwikkelingen zich tot nu toe hebben voorgedaan en welke processen hierbij een belangrijke rol kunnen spelen. Om meer inzicht te krijgen in de morfologische ontwikkelingen is er in hoofdstuk 4 een evenwichtsparametrisatie gemaakt van het watersysteem. Met deze parametrisatie kan er in hoofdstuk 5 meer inzicht worden verkregen in welke evenwichtssituaties kunnen ontstaan in het watersysteem en in hoeverre, gerelateerd aan waterdiepteverstoringen, deze ook daadwerkelijk bereikt kunnen worden. Verder wordt in hoofdstuk 5 bepaald hoe deze evenwichtssituaties worden beïnvloed door de geometrie van de nevengeul. Hieruit volgt in welke nevengeulen (sterke) sedimentatie verwacht kan worden. Om te bepalen op welke termijnen deze evenwichtsdieptes kunnen worden bereikt volgen er ook numerieke analyses in het SOBEK-RE 1D model. Hiervoor wordt in hoofdstuk 6 eerst een fictieve nevengeul gedefinieerd. Het verloop van de morfologische ontwikkelingen in de nevengeul en de termijnen waarin evenwichtsdieptes bereikt kunnen worden staat beschreven in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 worden er naar oplossingen gezocht, bestaande uit sedimentbeheersende maatregelen en morfologische neutrale ontwerppegels, waarmee de morfologische ontwikkelingen in de nevengeul beïnvloed kunnen worden. In hoofdstuk 9 volgen de effecten van deze maatregelen waaruit volgt welke maatregelen eventueel gebruikt kunnen worden in het beheer en onderhoud aan sedimenterende nevengeulen. In hoofdstuk 10 worden de conclusies van dit onderzoek beschreven gerelateerd aan de bovenstaande onderzoeksvragen. Ten slotte volgen er aanbevelingen in nader onderzoek om hoe in de toekomst beter omgegaan kan worden met sedimenterende nevengeulen.

3 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: processen & monitoring

Nevengeulen kunnen op verschillende manieren worden aangelegd, waardoor de term niet meer eenduidig gebruikt kan worden. Om deze reden wordt eerst een definitie van nevengeulen geformuleerd geldend voor dit onderzoek en wordt een verkenning gemaakt van reeds aangelegde en nog aan te leggen nevengeulen in het Nederlandse rivierengebied. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van processen die een belangrijke rol spelen bij de sedimentverdeling van benedenstroomse waterlopen en wordt kwalitatief bekeken in hoeverre deze processen ook een belangrijke rol kunnen spelen bij nevengeulen die momenteel worden aangelegd. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen bodem en suspensietransport. Tot slot worden drie nevengeulen geëvalueerd, die in het verleden morfologisch zijn gemonitord.

3.1 Wat zijn nevengeulen

Nevengeulen zijn parallel gelegen geulen aan de hoofdstroom, die vroeger in het Nederlandse rivierengebied veel zijn voor gekomen. Ze zijn ontstaan doordat over bepaalde trajecten in een rivier de dagelijkse variaties in afvoer en sedimentlasten de rivier breder en ondieper hebben gemaakt (Wolters, 2001). Het gevolg hiervan is geweest een sterke afname van de stroomsnelheid, waardoor eilandvorming is ontstaan onder de voorwaarde dat de breedte-diepte verhouding van de rivier groter is dan 100 (Schoor & Sorber 1998, Wolfert 1998; geciteerd in Wolters, Platteeuw & Schoor, 2001). Zodra deze verhouding is overschreden, heeft zich dit verder kunnen ontwikkelen tot een nevengeul. Als gevolg van de grootschalige normalisatie werken in de afgelopen eeuw zijn de natuurlijke nevengeulen in het Nederlandse rivierengebied echter allemaal verdwenen.

Omdat nevengeulen kunnen bijdragen aan de veiligheid en ruimtelijke (ecologische) kwaliteit in het huidige riviersysteem worden de nevengeulen nu weer kunstmatig aangelegd. Hierbij is de term ‘nevengeul’ niet meer eenduidig te gebruiken, doordat nevengeulen op verschillende manieren kunnen worden aangelegd.

Nevengeulen kunnen variëren in ten eerste één of tweezijdige aantakkingen op de hoofdgeul, ten tweede het wel of niet hebben van drempels bij de instroomopening van een nevengeul of ten derde door het aanwezig zijn van andere regulerende constructies die zorgen voor een al dan niet meestromende nevengeul. Al deze kenmerken bepalen in grote mate wat voor stromingspatroon zich gemiddeld over een jaar voordoet in een nevengeul en hoe vaak deze nevengeul daadwerkelijk mee stroomt met de hoofdgeul. Tevens bepalen deze kenmerken in hoeverre deze geulen kunnen bijdragen aan de doelstellingen ‘veiligheid’ en ‘ruimtelijke kwaliteit’ in het huidige rivierbeheer.

In de praktijk kunnen de volgende type nevengeulen onderscheiden worden (Peters, Kater & Geerling, 2006; Wolters, Platteeuw & Schoor, 2001)

- *Gecontroleerde permanente meestromende nevengeul*: een nevengeul die permanent met de rivier (hoofdgeul) in verbinding staat.
- *Gecontroleerde periodieke meestromende nevengeul*: een nevengeul die alleen bij hogere waterstanden in de hoofdgeul met de rivier in verbinding staat.
 - o Nevengeulen die een groot deel van het jaar meestromen (periodieke nevengeulen).
 - o Geulen die een klein deel van het jaar meestromen (hoogwatergeul, groene rivier, strang).
- Plassen (geulen) die meestromen bij hoge afvoeren en niet in verbinding staan met de hoofdriever (strang, uiterwaardplassen).

Een nevengeul wordt door Wolters, Platteeuw & Schoor (2001) gedefinieerd als “een parallel aan de hoofdstroom gelegen geul, waarin het water tijdens een groot deel van het jaar mee stroomt”. In dit onderzoek wordt een nevengeul gedefinieerd als “een ongelijkwaardige parallel aan de hoofdstroom gelegen geul, met een veiligheids en een ecologische doelstelling, waarin het water tijdens een groot deel van het jaar mee stroomt”. Door het hanteren van deze definitie worden andere uiterwaardwateren zoals strangen, plassen, groene rivieren en hoogwatergeulen niet gelijkgesteld aan nevengeulen zoals die in het afstudeeronderzoek bedoeld worden. Ook worden aftakingskanalen, waarbij de breedte verhouding (B_1/B_2) van beide kanalen min of meer aan elkaar gelijk zijn, niet gelijkgesteld aan de nevengeulen zoals bedoeld in dit afstudeeronderzoek.

3.2 Huidige en toekomstige nevengeulen in Nederland

De nevengeul Opijnen (1994), nevengeul Beneden Leeuwen (1997) en de nevengeulen van de Gamerensche Waard (1996–1999) zijn als eerste nevengeulen in de Rijntakken aangelegd. Momenteel zijn in de Rijntakken zes andere meestromende nevengeulen aangelegd, zie tabel 1. Doordat de nevengeulen recent zijn aangelegd, zijn hiermee nog geen lange termijn ervaringen opgedaan. Daarnaast zijn alleen de nevengeulen van Gameren, Beneden Leeuwen en Opijnen voor een kortstondige periode morfologisch gemonitord. De morfologische ontwikkeling van deze nevengeulen wordt verder beschreven in paragraaf 4.5.3. In de toekomst worden nog meer nevengeulen aangelegd, zowel in de Rijntakken als in de Maas, zie de overzichtlijst in appendix C. Uit deze opsomming kan worden afgeleid dat de morfologische ontwikkeling van nevengeulen een steeds een grotere rol gaat spelen in het huidige rivierbeheer met betrekking tot veiligheidsdoelstellingen en grootschalige onderhoud.

tabel 1: Huidige meestromende nevengeulen die recent zijn aangelegd in de Rijntakken.

<i>Nevengeul</i>	<i>Plaats</i>	<i>Aanlegjaar</i>	<i>Lengte [km]</i>	<i>Watervoerendheid</i>
Opijnen	Opijnen	1994	≈ 1	Vrijwel permanent
Beneden Leeuwen	Beneden-Leeuwen	1997	≈ 2	Vrijwel permanent
Gamerensche Waard (grote)	Gameren	1999	2	Permanent
Gamerensche Waard (oost)	Gameren	1996	0,5	Periodiek
Gamerensche Waard (west)	Gameren	1996	1	Periodiek
Bakenhof	Arnhem	2002	≈ 1	Permanent
Klommenwaard	Pannerden	1999	2*	Permanent
Klommenwaard	Pannerden	2000	3*	Periodiek
Vreugderijkerwaard	Zwolle	2002	2*	Permanent

*: geschatte waarden uit google maps (2009)

3.3 Beschrijving van de Rijn en de Waal (sediment en hydraulica)

De morfologische ontwikkeling van nevengeulen is ten eerste sterk afhankelijk van de hoeveelheid sediment en de afvoersituatie die zich voordoet in de rivier waarop een nevengeul is aangetakt. Onderstaand worden alleen de afvoer en sediment karakteristieken van de rivieren Rijn en Waal beschreven, omdat tot op heden er alleen in deze rivieren nevengeulen zijn aangelegd.

Afvoer karakteristieken Rijn en Waal

Via Lobith stroomt de Rijn Nederland binnen en splitst zich vervolgens op in het Pannerdensch kanaal en in de rivier de Waal. Het Pannerdensch kanaal splitst zich weer op in de Neder-Rijn en in de IJssel (figuur 20). De maatgevende afvoer van de Rijn is vastgesteld op 16.000 m³/s (RIZA, 2001). Tijdens deze maatgevende afvoerconditie wordt 10.165 m³/s (64 procent) naar de Waal en 5835 m³/s (36 procent) naar het Pannerdensch kanaal getransporteerd (Schielen, Jesse & Bolwidt, 2007). Tijdens lagere afvoercondities blijft de afvoerverdeling tussen de Waal en het Pannerdensch nagenoeg gelijk. Tijdens een afvoerconditie van 2500 m³/s in de Bovenrijn wordt 1700 m³/s naar de Waal (68 procent) en 800 m³/s (32 procent) naar het Pannerdensch kanaal getransporteerd. Hieruit valt te concluderen dat de afvoerverdeling tussen de Waal en het Pannerdensch kanaal wordt verdeeld in een verhouding van respectievelijk 2/3 en 1/3. Echter deze verhouding geldt niet voor de sedimentverdeling zoals beschreven bij de sedimentkarakteristieken Rijn en Waal. Verder ligt de gemiddelde afvoer van de Rijn op 2.300 m³/s en de gemiddelde afvoer van de Waal op 1.600 m³/s met een geulvullende afvoer van 2.000 m³/s (Ghimire, 2003). Voor de Waal is 8035 m³/s (in 1926) de hoogste en 505 m³/s (in 1947) de laagste afvoer die ooit gemeten is (Ghimire, 2003). Deze en overige afvoer karakteristieken van de Rijn en de Waal zijn terug te vinden in appendix D. Een historische 15 jarige afvoerreeks door de Rijn en Waal is weergegeven in figuur 22 en in figuur 23.

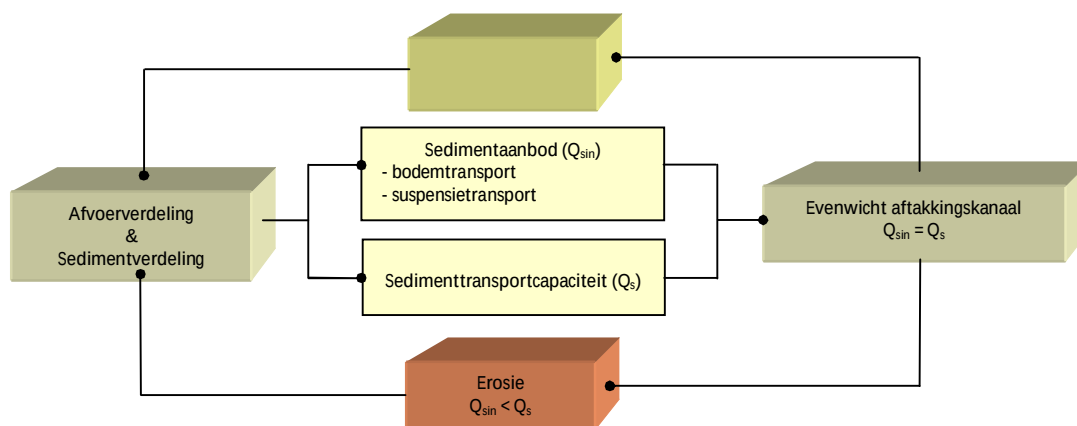
Sediment karakteristieken Rijn en Waal

Sediment kan in een rivier zowel via bodem- als via suspensietransport worden getransporteerd. Grof sediment (zand) wordt hoofdzakelijk via bodemtransport getransporteerd in tegenstelling tot 'wash load', het fijne sediment (slib) dat alleen via suspensie wordt getransporteerd en pas sedimenteert wanneer de stroomsnelheden kleiner zijn dan 0,3 m/s. In het algemeen vindt meer sedimenttransport plaats tijdens hoge afvoercondities dan bij lage afvoercondities. Jaarlijks transporteert de Rijn ongeveer 500.000 m³ zand en grind en 2.500.000 ton slib. Voor de Rijntakken is globaal bekend dat ongeveer 25 procent van de jaarvracht tijdens hoge afvoeren wordt getransporteerd, terwijl deze afvoeren maar 4 procent van de tijd beslaan (Middelkoop

1997, ten Brinke et al. 2000; geciteerd in Wolters et al, 2001). Door Ghimire (2003) is een schatting gemaakt dat door de Waal gemiddeld 280.000 m^3 sediment in vorm van bodemtransport en $1.400.000 \text{ m}^3$ sediment in suspensie wordt getransporteerd. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het sediment vanuit de Bovenrijn merendeels naar de Waal wordt getransporteerd. Bij hoge afvoercondities wordt zelfs 88 procent van het sediment en maar 67 procent van de afvoer van de Bovenrijn naar de Waal getransporteerd. (Ten Brinke, 2005 ; geciteerd in Schielen, Jesse & Bolwidt, 2007). Deze scheve sedimentverdeling kan verklaard worden aan de hand van de sedimentverdeling processen zoals deze beschreven worden in paragraaf 3.4.1. Doordat er door de Waal relatief veel sediment wordt getransporteerd zullen de nevengeulen die in de Waal worden aangelegd ook relatief meer sediment onttrekken.

3.4 Morfologisch evenwicht van aftakkingen en bijhorende processen

De morfologische ontwikkeling van aftakkingen in een rivier (bijvoorbeeld een nevengeul) wordt bepaald door de verhouding in het sedimentaanbod en de transportcapaciteit van sediment in de nevengeul. Een aftakking is in evenwicht wanneer bij een zekere afvoerverdeling het sedimentaanbod (Q_{sin}) gelijk is aan de sedimenttransportcapaciteit (Q_s) van een kanaal. In andere gevallen zal een aftakkingskanaal sedimenteren ($Q_{\text{sin}} > Q_s$) of eroderen ($Q_{\text{sin}} < Q_s$) die vervolgens weer de afvoerverdeling en de sedimentverdeling beïnvloeden, zie figuur 1. De sedimentbeweging is dus afhankelijk van de waterbeweging (zonder waterbeweging is er geen sedimenttransport) en dus van de afvoerverdeling. Een aftakking die een grotere afvoer onttrekt zal in principe ook in verhouding meer sediment onttrekken. Dit blijkt ook uit een analyse in appendix L waarbij een nevengeul met een beperkte debietonttrekking niet snel meer dan 10 procent van het totale sedimenttransport in de Waal zal onttrekken.



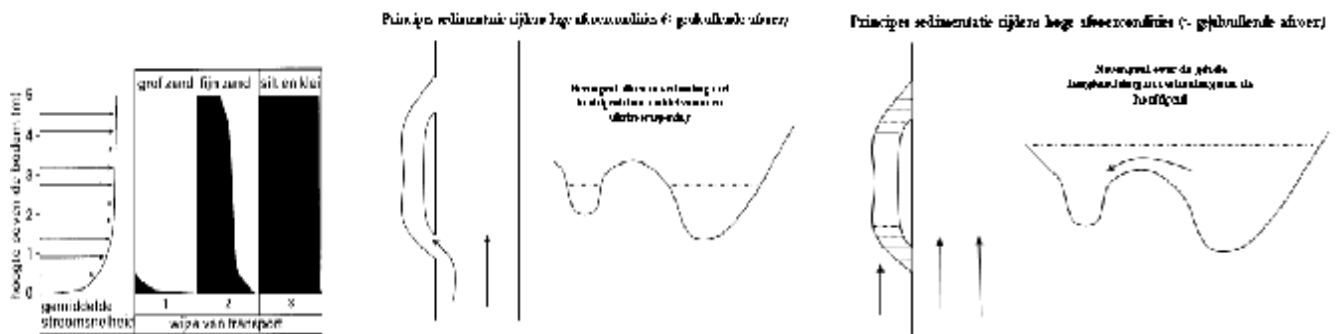
figuur 1: In de blokken schematisatie worden de relaties aangegeven tussen de afvoer- en sedimentverdeling in samenhang met het evenwicht van een aftakkingskanaal.

Om de morfologische ontwikkeling van nevengeulen verder te beschrijven, in relatie met achterliggende processen, moet er een onderscheid worden gemaakt in sediment dat via bodem- en/of via suspensietransport naar de nevengeul wordt getransporteerd en tussen afvoercondities die hoger of lager zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed.

Bij relatieve lage afvoeren staat de nevengeul alleen in verbinding met de rivier door middel van de in- en uitstroomopening, waarbij een zekere afvoer- en een sedimentverdeling ontstaat tussen de hoofd- en nevengeul. Tijdens deze afvoercondities kan juist het grove sediment, dat via bodemtransport wordt getransporteerd, scheef worden verdeeld naar de afvoerdivergentie. Dit heeft te maken met het feit dat het grove sediment in het lagere gedeelte van de waterkolom wordt getransporteerd (zie figuur 2) en dus een non-uniforme sedimentconcentratie heeft over de verticale waterkolom. Ten gevolge van verschillende processen (zie paragraaf 3.4.1) die de stroming op de bodem beïnvloeden, kan er te veel sediment naar de nevengeul worden getransporteerd. In dit geval kan het sedimentaanbod groter zijn dan de daadwerkelijke transportcapaciteit, waardoor de nevengeul sedimentatie zal ondervinden.

Daarentegen zal het sediment dat via suspensie wordt getransporteerd, waarbij de sedimentconcentratie uniform verdeeld is over de verticale waterkolom (figuur 2), tijdens lage afvoercondities meer evenredig naar

de afvoerverdeling verdeeld worden. Het sedimentaanbod van dit type sediment naar de nevengeul zal hierdoor min of meer gelijk zijn aan de sedimenttransportcapaciteit waardoor dit type sediment minder snel zal sedimenteren.



figuur 2: In de figuur (links) wordt weergegeven hoe verschillende sedimenttypen verdeeld zijn over de verticale waterkolom waarbij (1): bodemtransport (2): gesuspendeerd bodemtransport (3): suspensie transport, uit Wolter (2001). In de figuur (rechts) wordt een onderscheid gemaakt in sediment uitwisseling tussen de rivier en nevengeul tijdens relatieve lage en hoge afvoeren.

Bij relatieve hoge afvoeren staat de nevengeul over de gehele lengterichting in verbinding met de rivier. Hierbij kan uitwisseling van sediment over de gehele lengterichting van de nevengeul plaatsvinden (zie figuur 2). In deze situatie vormen de nevengeul en de hoofdgeul één systeem en is er geen sprake meer van één duidelijk te scheiden afvoer- en sedimentverdeling. Dit komt omdat de eenduidige afvoer- en sedimentverdeling die ontstaat bij lage afvoercondities nu ook beïnvloed wordt door de uiterwaardstroming. Ook in deze situaties vindt slechts sedimentatie plaats in de nevengeul wanneer het sedimentaanbod groter is dan de transportcapaciteit die beïnvloed wordt door achterliggende processen (zie paragraaf 3.4.2).

3.4.1 Sedimentaanbod versus sedimenttransportcapaciteit tijdens lage afvoercondities

In deze paragraaf worden sedimentverdelingsprocessen kwalitatief beschreven die de sedimentverdeling bepalen bij gelijkwaardige aftakkingen tijdens lage afvoercondities. Het sedimentaanbod aan een aftakking in vorm van bodemtransport wordt beïnvloed door de bifurcatiehoek (afsplittingshoek), ligging en vormgeving van de instroomopening (Mosselman, 2001). Ook dwarshellingen en bodemvormen, bovenstrooms van het splitsingspunt, kunnen de sedimentverdeling sterk beïnvloeden (Kleinmans, 2008). Deze processen beïnvloeden ook de sedimentverdeling bij nevengeulen, maar de effecten kunnen verschillen doordat nevengeulen juist ongelijkwaardig worden aangetakt aan een rivier. Om deze reden worden de effecten van deze sedimentverdelingsprocessen in paragraaf 3.4.3 nog eens apart geëvalueerd versus het ontwerp en de ligging van een nevengeul.

Bifurcatiehoek

De bifurcatiehoek is de hoek die de aftakking maakt met de hoofdgeul bij de instroomopening, zie ook bijlage F. De invloed van de bifurcatiehoek in relatie met het sedimentaanbod naar een nevengeul kan verklaard worden aan de hand van het Bulle-Effect in combinatie met de primaire waterstroming. Door de Heer (2003) is dit overzichtelijk beschreven aan de hand van een literatuurstudie waarin het onderzoek van Bulle (1926) en het onderzoek van Riad (1961) opgenomen zijn.

Primaire waterstroming en het Bulle effect

Om het Bulle effect te verklaren moet er een onderscheid worden gemaakt in het systeem tussen een moedergeul, hoofdgeul en een aftakking. De moedergeul is de geul die zich bovenstrooms bevindt van het splitsingspunt, het punt waarbij de moedergeul zich splitst in een hoofdgeul en een aftakking. Doordat een aftakking een hoeveelheid water onttrekt aan de hoofdgeul moet er bovenstrooms in de moedergeul een denkbeeldige scheidingslijn ontstaan, waarover de afvoer zich verdeelt naar de hoofdgeul en de aftakking. Deze scheidingslijn wordt ook wel de primaire stroming genoemd (Heer, 2003). De afstand van waar de scheidingslijn zich bevindt ten opzichte van de oever van de moedergeul, waar de aftakking is op aangetakt, kan eenvoudig berekend worden met vergelijking 1a. In deze vergelijking neemt de afstand van de scheidingslijn lineair toe met de relatieve debietverhouding tussen de aftakking en de moedergeul (hoe groter

de afvoer naar de aftakking des te verder komt de scheidingslijn in de moedergeul te liggen). De afvoeren naar beide kanalen kunnen berekend worden met vergelijking 1b (Heer, 2003).

$$\text{Afstand scheidingslijn} = B_0 \cdot \frac{Q_2}{Q_0} \quad (1a)$$

$$Q_i = C_i \cdot B_i \cdot h_i \cdot \sqrt{R_i \cdot ib_i} \quad (1b)$$

index i = 0 (moedergeul), 1 (hoofdgeul), 2 (aftakking)

B_i = breedte geul [m]

Q_i = afvoer geul [m^3/s]

h_i = waterdiepte [m]

R_i = hydraulische straal [m]

ib_i = verhang [-]

Doordat een bepaalde hoeveelheid water naar de aftakking wordt afgebogen ontstaat er naast de primaire stroming ook een secundaire stroming bij het splitsingspunt. Door de traagheid van het water heeft het water de neiging om niet afgebogen te worden naar de aftakking, waardoor er een centrifugale kracht ontstaat in de waterbeweging. Deze centrifugale kracht duwt het water naar de buitenzijde (richting hoofdgeul), waardoor er een verhang in de waterspiegel ontstaat in de dwarsrichting rondom het splitsingspunt. Hierbij is de dwarshelling van de waterspiegel het laagst bij de oeverknik van de aftakking, zie ook appendix E. Door de dwarshelling van het waterverhang en de zwaartekracht ontstaat er ook een drukkracht. Deze drukkracht is een tegenbeweging van de centrifugale kracht, die het water weer richting de binnenzijde drukt (richting aftakking). Doordat de centrifugale kracht afhankelijk is van de stroomsnelheid, is deze kracht het grootst aan het wateroppervlak. De stroomsnelheid is namelijk niet uniform over de verticale waterkolom, waarbij de stroomsnelheid het hoogst is aan het wateroppervlak (figuur 2). De drukkracht varieert ook over de verticale waterkolom en is het grootst ter hoogte van de bodem (grootste waterdiepte). De resultante van beide krachten zorgt voor een waterbeweging, aan het wateroppervlak naar de buitenzijde en een waterbeweging ter hoogte van de rivierbodem naar de binnenzijde. Hierdoor ontstaat er een secundaire stroming die, in combinatie met de stroming in de lengterichting, tot een spiraalstroming kan ontwikkelen. De secundaire stroming is dus de afwijking van de primaire stroming, die samen tot de werkelijke stroming leidt bij het splitsingspunt (Riad 1961, geciteerd in de Heer, 2003). Als gevolg van deze spiraalstroming, ontstaat er een uitwisseling van water tussen de primaire stroming en de stroming naar de hoofdgeul. Bij deze uitwisseling wordt er relatief sedimentrijk water, op de bodem van de hoofdgeul naar de primaire waterstroming, en dus naar de aftakking getransporteerd. Tegelijkertijd wordt er relatief sedimentarm water, aan het wateroppervlak van de primaire waterstroming, naar de hoofdgeul getransporteerd (figuur 4 in paragraaf 3.4.3).

Deze spiraalstroming, waarbij sedimentrijk water naar het aftakkingskanaal en sedimentarm water naar de hoofdgeul wordt getransporteerd, is ook waargenomen in de schaal experimenten van Bulle (1926). Een overzicht van deze stromingspatronen, zoals beschreven door Bulle (1926; geciteerd in de Heer, 2003), is weergegeven in appendix E. Het is wel belangrijk op te merken dat de experimenten van Bulle met een vaste bodem zijn uitgevoerd. Om deze reden moeten de resultaten met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Kwalitatief geven deze experimenten van Bulle wel meer inzicht in wat er kan gebeuren bij gelijkwaardige aftakkingen (van der Mark, 2004).

Neervorming

Naast het Bulle effect kunnen er rondom het splitsingspunt ook drie neren ontstaan die in eerste instantie de afvoerdeling beïnvloeden (Heer, 2003). Zo ontstaat er een neer aan de bovenstroomse oeverkant van de aftakking als gevolg van de traagheid waarmee het water naar de aftakking wordt afgebogen, zie ook de schematisatie van het Bulle Effect in appendix E. Dit komt omdat het water pas wordt afgebogen naar de aftakking, wanneer de breedte van de hoofdgeul enige tijd vergroot is. De omvang van deze neer wordt sterk beïnvloed door de bifurcatiehoek en bepaalt uiteindelijk de effectieve doorstroming naar de aftakking. Ook ontstaat er een neer in de oeverkant van de hoofdgeul tegenover de aftakking benedenstrooms van het splitsingspunt. Deze neer ontstaat doordat de stroomsnelheid in de hoofdgeul zich nog niet heeft aangepast aan de lagere afvoer. Vanwege het afbuigen van de stroming in de hoofdgeul naar de aftakking laat de stroming vlakbij de oever tijdelijk los en kan hier een neer ontstaan. Verder kan er ook een neer ontstaan bij de

bodem bovenstrooms van het splitsingspunt bij de kop van de aftakking. Deze neer vindt zich afwisselend in hoofdgeul en in de aftakking.

Spiraalstroming in een bochtige rivier

De ligging van de instroomopening van een aftakking speelt een belangrijke rol voor het sedimentaanbod, wanneer een aftakking wordt aangelegd in een bochtige rivier. Naast de spiraalstroming, die ontstaat door de wateronttrekking van een nevengeul (Bulle effect), ontstaat er ook een spiraalstroming in een bochtige rivier. Als gevolg van deze spiraalstroming wordt er sedimentrijk - water over de bodem - naar de binnenbocht en sedimentarm water - aan het wateroppervlak - naar de buitenbocht getransporteerd (Rozovskij, 1957). Wanneer in een bochtige rivier de instroomopening van een aftakking in een binnenbocht wordt aangelegd, zal er meer sediment door de aftakking onttrokken worden. Dit in tegenstelling tot het geval wanneer de instroomopening van deze aftakking in een buitenbocht is aangelegd.

Dwarshelling bij splitsingspunt

Wanneer bij splitsingspunten te veel sediment in verhouding met het debiet naar één van de kanalen wordt getransporteerd zal dit leiden tot sedimentatie. Op den duur, wanneer deze sedimentatie blijft doorgaan, zal het bodempeil in het kanaal toenemen en kan er een dwarshelling ontstaan (Kleinhans, 2008). Bij gelijkwaardige aftakkingen met geen regulerende constructies (bijv. kribben) kan deze dwarshelling al bovenstrooms van het splitsingspunt in de moedergeul ontstaan (binnen de primaire waterstroming). Als gevolg van deze dwarshelling moet het sediment tegen de zwaartekracht in worden getransporteerd, waardoor het sedimenttransport naar de aftakking afneemt. Theoretisch kan er een moment ontstaan waarbij het tegeneffect van de dwarshelling gelijk is aan het effect van spiraalstroming in de rivier. In deze situatie, zonder rekening te houden met andere processen, kan een nevengeul morfologisch stabiel zijn (Kleinhans, 2008).

Bodemvormen (bars) nabij het splitsingspunt

In rivieren ontstaan ook bodemvormen die de afvoer en dus ook de sedimentverdeling tussen beide kanalen sterk kunnen veranderen. Ook 'barvorming' in bochtige rivieren kan de afvoer- en sedimentverdeling sterk beïnvloeden (Kleinhans, 2008). Vooral tijdens hogere afvoeren zijn de dimensies en de invloeden van deze bodemvormen op de afvoer- en sedimentverdeling zeer variabel en kunnen een dynamische impuls geven aan de verdere morfologische ontwikkeling.

Transportcapaciteit van sediment in nevengeul

De transportcapaciteit van een kanaal wordt bepaald door de stroomsnelheid, het vermogen om sediment te kunnen transporteren. De stroomsnelheid in een kanaal (nevengeul) kan bepaald worden met de volgende vergelijkingen 2a en 2b:

$$\text{Krachten balans: } u_i = C_i \cdot \sqrt{h_i \cdot i b_i} \quad (2a)$$

$$\text{Massa balans: } u_i = \frac{Q_i}{B_i \cdot h_i} \quad (2b)$$

u_i = stroomsnelheid nevengeul [m/s]

Q_i = debiet nevengeul [m³/s]

B_i = breedte nevengeul [m]

h_i = waterdiepte nevengeul [m]

C_i = Chezy coëfficiënt [m^{1/2}/s]

$i b_i$ = verhang van kanaal [-]

Met deze vergelijkingen is te zien hoe verandering van de variabelen resulteren in verandering van de stroomsnelheid. De stroomsnelheid in een nevengeul neemt toe wanneer het verhang van de nevengeul groter wordt (lengte nevengeul wordt korter) of door versmallingen in het dwarsprofiel. Ook neemt de stroomsnelheid toe wanneer de stromingsweerstand kleiner wordt (Chezy coëfficiënt neemt toe). Echter de invloed van vegetatie op sedimenttransport, als gevolg van een extra weerstand, kan nog niet nauwkeurig bepaald worden. De waterdiepte in de nevengeul wordt bepaald aan de hand van de aanlegdiepte en het waterpeil op het splitsingspunt.

3.4.2 Sedimentaanbod versus sedimenttransportcapaciteit tijdens hoge afvoercondities

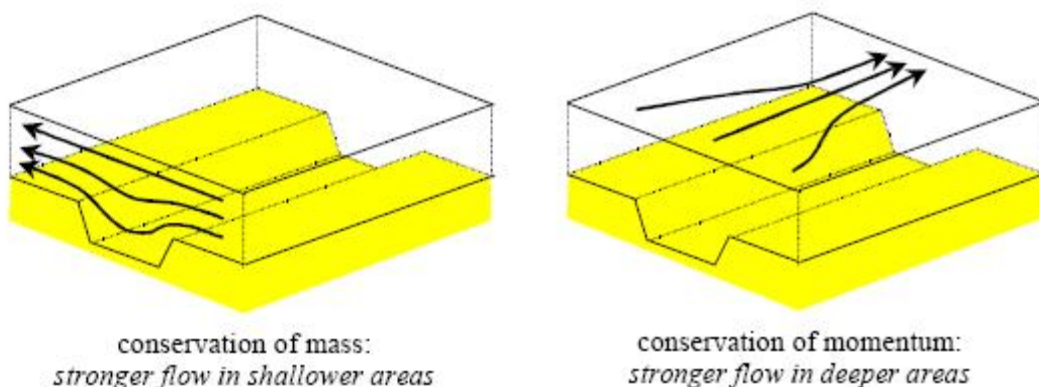
Bij relatief hoge afvoeren staat de nevengeul over de gehele lengterichting in verbinding met de rivier. Hierbij kan uitwisseling van sediment over de gehele lengterichting van de nevengeul plaatsvinden (zie figuur 2). In deze situaties wordt de afvoer- en sedimentverdeling tussen de hoofd- en nevengeul, zoals die ontstaat bij lage afvoercondities, beïnvloedt door de uiterwaardstroming. Wel kan het sedimentaanbod nog steeds groter zijn dan de sedimenttransportcapaciteit van de nevengeul. Zo verhogen oeverwal afzettingen het sedimentaanbod aan een nevengeul en beïnvloedt de oriëntatiehoek de transportcapaciteit van de nevengeul tijdens hogere afvoercondities.

Oriëntatiehoek van nevengeul

De oriëntatiehoek is de gemiddelde hoek tussen de nevengeul met de uiterwaardstroming, zie ook appendix F. Tijdens hoge afvoeren is er een waterflux over de uiterwaarden waarbij de waterdiepte toeneemt wanneer deze ook over de nevengeul stroomt. Afhankelijk van de oriëntatiehoek zal deze grotere waterdiepte zorgen voor een verhoging (resp. verlaging) van de stroomsnelheid en zal de transportcapaciteit van de nevengeul toenemen (resp. afnemen).

De massabalans is het dominerende principe dat moet gelden bij nevengeulen die een grote oriëntatiehoek vormen met de uiterwaardstroming (links in figuur 3). In dit geval leidt een zekere afvoer over de uiterwaarden gecombineerd met een waterdieptevergroting tot verlaging van de stroomsnelheid (zie vergelijking 2a). Doordat de stroomsnelheid afneemt zullen nevengeulen, die een grote oriëntatiehoek maken met de uiterwaardstroming, een lagere sedimenttransportcapaciteit hebben (Baptist & Mosselman, 2002). Hierdoor zal er eerder sedimentatie optreden in de nevengeul. Veelal zal dit ook overeenkomen met de natuurlijke aanzandingsplekken die in de uiterwaard van nature voorkomen tijdens hoogwatersituaties.

De krachtenbalans is het dominerende principe dat moet gelden bij nevengeulen die een kleine oriëntatiehoek vormen met de uiterwaardstroming (rechts in figuur 3). In dit geval leidt een zekere afvoer over de uiterwaarden in combinatie met een waterdieptevergroting tot verhoging van de stroomsnelheid (zie vergelijking 2b). Doordat de stroomsnelheid toeneemt zullen nevengeulen, die een kleine oriëntatiehoek maken met de uiterwaardstroming, een hogere transportcapaciteit van sediment hebben (Baptist & Mosselman, 2002). Hierdoor zal er in deze nevengeulen eerder erosie verwacht kunnen worden.



figuur 3: schematisatie van de massa en krachten balans. Uit: Baptist & Mosselman (2002)

De oriëntatiehoek heeft vooral invloed op fijn sediment, doordat dit type sediment relatief lang over de uiterwaard getransporteerd kan worden. Het zwaardere materiaal, dat getransporteerd wordt via bodemtransport, sedimenteert direct, in vorm van oeverwal afzettingen (Peters, Kater & Geerling, 2006; Wolters, Platteeuw & Schoor, 2001), op de oever van de uiterwaard of wordt verder door de hoofdgeul getransporteerd.

Oeverwal afzetting tijdens hoogwatersituaties

Tijdens een hoogwatersituatie, wanneer er geen nevengeulen zijn aangelegd, treedt er ook sedimentatie op in de uiterwaarden. Dit proces komt tot stand doordat de stroomsnelheid over de uiterwaarden veel lager is dan de stroomsnelheid in het zomerbed van de rivier. Hierdoor ontstaat een sedimentflux richting de uiterwaarden. Aangezien de gemiddelde stroomsnelheid in de breedte van de uiterwaarden steeds verder afneemt, ontstaat er een laterale sortering in de afzetting op de uiterwaarden. Hierbij zal zand net voorbij het zomerbed, tijdens

een hoogwater situatie, in vorm van een oeverwal worden afgezet. Fijner sediment, zoals slib, wordt veel verder in de uiterwaarden getransporteerd. Bij het aanleggen van een nevengeul in de uiterwaarden zal dit sedimentatieproces waarschijnlijk beïnvloed worden maar niet verdwijnen. Hierdoor zullen nevengeulen die vlak naast het zomerbed worden aangelegd met hetzelfde sediment (fijn tot grof zand) worden opgevuld, tijdens hoge afvoersituaties, waarmee ook de natuurlijke oeverwallen gevormd worden op de uiterwaarden.

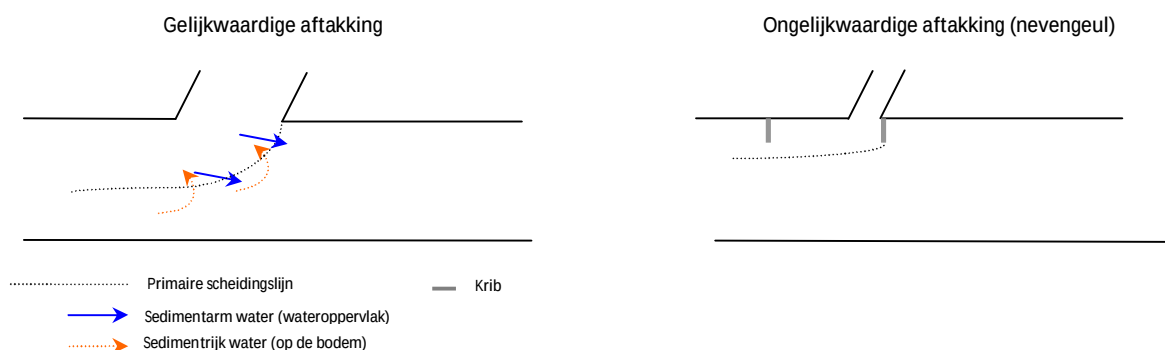
3.4.3 Nevengeulontwerp versus sediment verdelingsprocessen

Bovenstaand zijn de algemene processen beschreven die het sedimentaanbod naar een aftakking beïnvloeden. Hierbij zijn hoofdzakelijk processen beschreven die een invloed kunnen uitoefenen op de sedimentverdeling, in relatie met het bodemtransport, op een splitsingspunt tijdens relatieve lage afvoercondities. De invloeden van deze processen worden weer grotendeels bepaald door het ontwerp en de ligging van de nevengeul. Een aantal ontwerpparameters van een nevengeul, zoals beschreven in de definitie, bestaan uit het verhang (lengte), breedte en het niveau van aantakking (gelijkwaardige of ongelijkwaardige aantakking). Daarnaast kan een nevengeul in een rechte of een bochtige rivier (binnen of buitenbocht) worden aangelegd. Verder worden de volgende basis ontwerpregels gehanteerd bij het aanleggen van nevengeulen, zie ook appendix G:

- indien voldoende vaardiepte aanwezig is (2,8 meter voor de Waal) wordt de richtlijn gehanteerd dat de afvoer naar de nevengeul niet groter mag zijn dan 3 procent van de totale afvoer tijdens geulvullende afvoercondities van het zomerbed. Met deze richtlijn is de verwachting dat de sedimentatie beperkt blijft tot globaal 20 cm in de hoofdgeul;
- de gemiddelde stroomsnelheid in de nevengeul ligt rond de 0,3 m/s tijdens geulvullende afvoercondities van het zomerbed, waardoor de morfologische activiteit in de nevengeul beperkt blijft. Vanuit ecologie zijn stroomsnelheden gewenst tussen de 0,1 m/s en 0,3 m/s die met bovenstaande richtlijnen goed gecombineerd kunnen worden;
- nevengeulen worden 50 á 100 meter van de winterdijk aangelegd, waardoor de kans op mechanische instabiliteit van de winterdijk zo klein mogelijk wordt gehouden.

Aantakking nevengeul op een rivier

Tot op heden worden meestromende nevengeulen in de Rijntakken ongelijkwaardig aangetakt. Daarnaast onttrekken nevengeulen globaal niet meer dan 3 procent van de totale afvoer tijdens geulvullende afvoersituaties (Mosselman, 2001). Als gevolg van een relatieve kleine debietonttrekking zal de primaire scheidingslijn (zie beschrijving bifurcatiehoek) relatief dicht bij de instroomopening van de nevengeul liggen (kop van kribvak). Doordat de scheidingslijn niet ver in de moedergeul ligt, zal er relatief minder sediment via de primaire waterstroming naar de nevengeul getransporteerd worden in vergelijking tot een gelijkwaardige aftakking. Daarnaast zal ook de dwarshelling in de waterspiegel als gevolg van de kromming van het water, door de relatieve kleine debietonttrekking door een nevengeul, kleiner zijn. Hierdoor zal het Bulle effect, het effect waarbij extra sediment vanuit de moedergeul naar de primaire waterstroming wordt getransporteerd, kleiner zijn ten opzichte van gelijkwaardige aftakkingen.



figuur 4: In de figuur (links) is een schematisatie van een 'gelijkwaardige' aftakking weergegeven, waarbij de afvoer naar de aftakking relatief groot is. Door deze grote onttrekking zal de primaire waterstroming zich ver in de hoofdgeul bevinden (zie vergelijking 1a), waardoor al relatief veel sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Daarnaast ontstaat er een dwarshelling in het waterverhang als gevolg van de relatieve grote onttrekking in samenhang met de kromming van het water. Door deze dwarshelling ontstaat er een spiraalstroming (het Bulle Effect), waarbij naast de primaire stroming, extra sediment van de hoofdgeul naar de aftakking wordt getransporteerd. In de figuur (rechts) is een 'ongelijkwaardige' aftakking (nevengeul) geschematiseerd, met de instroomopening tussen een kribvak, waarbij relatief weinig afvoer naar de

nevengeul wordt getransporteerd. In dit geval zal het Bulle Effect klein zijn, doordat er geen grote dwarshelling ontstaat in de waterspiegel als gevolg van een relatief kleine onttrekking. Hierdoor wordt hoofdzakelijk alleen het sediment dat zich in de primaire waterstroming bevindt naar de nevengeul getransporteerd. Doordat de primaire waterstroming niet ver in de rivier ligt zal er relatief weinig sediment naar de nevengeul worden getransporteerd.

Breedte van de nevengeul

De breedte van een nevengeul wordt min of meer begrensd door de keuze om de nevengeul gelijkwaardig of ongelijkwaardig aan te takken op een rivier (moedergeul). Daarnaast geldt hoe groter de breedte van de nevengeul des te meer afvoer aan de rivier wordt onttrokken. Hierdoor zal de primaire scheidingslijn verder in de rivier komen te liggen waardoor meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. In principe hoeft dit niet direct tot meer sedimentatie in de nevengeul te leiden doordat tegelijkertijd het debiet naar de nevengeul toeneemt. Wel dient er rekening gehouden te worden met dat het Bulle Effect een steeds grotere rol gaat spelen bij steeds grotere debietonttrekkingen. Met het Bulle Effect wordt extra sediment naar de aftakking getransporteerd waardoor een schevere sedimentverdeling ontstaat.

Ligging instroomopening van nevengeul in een bochtige rivier

Door spiraalstroming wordt er in een bochtige rivier sedimentrijk water - over de bodem - naar de binnenbocht en sedimentarm water - aan het wateroppervlak - naar de buitenbocht getransporteerd (Rozovskij, 1957). Dit betekent dat het sedimenttransport in een bochtige rivier hoofdzakelijk plaatsvindt van de buitenbocht naar de binnenbocht. In het geval dat de instroomopening van een nevengeul in begin buitenbocht of in binnenbocht wordt aangelegd zal er, ondanks dat de primaire waterstroming dicht bij de instroomopening van de nevengeul ligt, relatief meer sediment naar de nevengeul getransporteerd worden. Dit komt omdat dan veel sediment van de rivier zich bevindt in de baan van de primaire waterstroming. Om het sedimentaanbod naar de nevengeul, in een bochtige rivier, zoveel mogelijk te beperken is het dus belangrijk dat de instroomopening van een nevengeul zo veel mogelijk in het 'einde' van een buitenbocht wordt aangelegd (Akkerman 1993; geciteerd in de Heer, 2003). Juist tegen het 'einde' van een buitenbocht heeft de spiraalstroming zich in een rivier volledig kunnen ontwikkelen.

Drempelconstructies

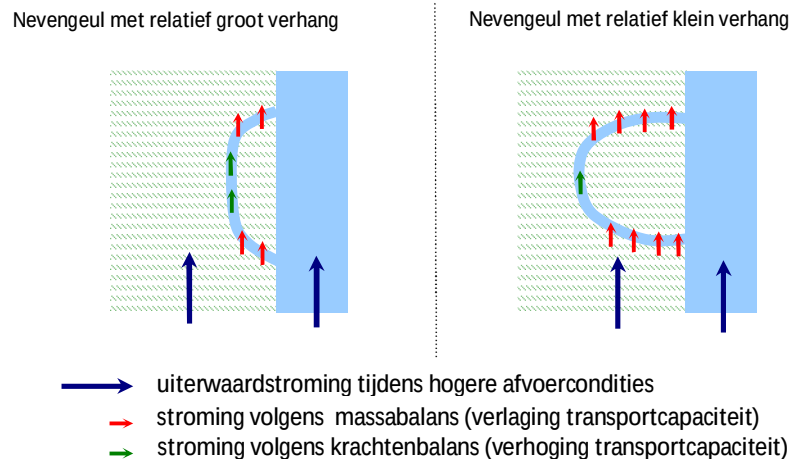
Veelal worden drempelconstructies aangelegd bij de instroomopening van een nevengeul die het sedimentaanbod en de sedimenttransportcapaciteit van de nevengeul kunnen beïnvloeden. Hierdoor zal de morfologische ontwikkeling hoofdzakelijk vertraagd worden, doordat de nevengeul minder vaak mee stroomt. Daarnaast kunnen deze constructies ook het sedimenttransport via bodemtransport naar nevengeulen reduceren. Echter in hoeverre deze constructies daadwerkelijk het sedimenttransport naar de nevengeul beperken is nog onbekend (Mosselman, 2001). De nevengeulen van Gamareren zijn voorzien van drempelconstructies, terwijl hier toch aanzienlijke sedimentatie is opgetreden (Jans, 2004).

Kribvakken en dwarshellingen

In de praktijk worden nevengeulen veelal tussen kribvakken haaks op de stromingsrichting van de rivier aangelegd, waardoor de bifurcatiehoek globaal gelijk is aan 90 graden. Hierdoor ontstaat er een neer in het kribvak waardoor de effectieve doorstroming naar de nevengeul kleiner wordt. Als gevolg van de relatieve kleine debietonttrekking door de nevengeul ligt de primaire waterscheiding vlakbij de kop van het kribvak. De dwarshellingen die kunnen ontstaan, in aftakkingen (gelijkwaardig) van meanderende rivieren zoals bedoeld door Kleinhans (2008), kunnen zich ook voordoen bij nevengeulen waarbij de instroomopening tussen een kribvak ligt. Echter in deze situaties zal de dwarshelling zich niet bevinden in de moedergeul, als gevolg van te hoge stroomsnelheden in de rivier, maar eventueel in het kribvak of in de nevengeul zelf. Hierbij kan de oever van het zomerbed ook gezien worden als een dwarshelling voor nevengeulen.

Verhang van de nevengeul

Het verhang van de nevengeul wordt bepaald door de lengte van de nevengeul en de afstand tussen de twee splitsingspunten (in- en uitstroomopening) van de rivier. Wanneer het verhang van de nevengeul kleiner wordt zal de afvoer naar de nevengeul afnemen (tijdens lage afvoercondities). Hierdoor zal er minder debiet en dus minder sediment naar de nevengeul worden getransporteerd. Echter wanneer het verhang van de nevengeul kleiner wordt kan de oriëntatiehoek van de nevengeul in combinatie met de uiterwaardstroming juist toenemen (figuur 5). Dit betekent dat de stroomsnelheid afneemt waardoor de sedimenttransportcapaciteit lager wordt. Hierdoor wordt er juist meer sediment afgezet in de nevengeul tijdens hogere afvoercondities.



figuur 5: in deze schematisatie zijn (lokale) oriëntatiehoeken weergegeven die de uiterwaardstroming vormt met de nevengeul in een rechte rivier tijdens hogere afvoercondities. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen een relatief hoog en een laag verhang in de nevengeul. Juist bij nevengeulen die relatief een laag verhang hebben maken een grote oriëntatiehoek(en) met de uiterwaardstroming. In deze schematisatie is de uiterwaardstroming parallel aan de rivier verondersteld maar hoeft in werkelijkheid niet altijd zo te zijn. De principes blijven echter wel hetzelfde.

3.4.4 Morfologische ontwikkeling van nevengeulen versus processen

In situaties wanneer het sedimentaanbod groter (resp. kleiner) is dan de sedimenttransportcapaciteit zal de nevengeul sedimenteren (resp. eroderen). Het probleem is echter dat voornamelijk het sedimentaanbod naar nevengeulen, voor zowel lage en hoge afvoercondities, nog niet goed voorspeld kan worden. De reden is dat de achterliggende processen die de sedimentbeweging beïnvloeden nog niet (volledig) kwantitatief beschreven zijn (Mosselman, 2001). Daarom is het ook nog onbekend op welke tijdschaal nevengeulen zich morfologisch kunnen ontwikkelen (sedimentaanbod versus transportcapaciteit). Wel is het duidelijk dat er een onderscheid moet worden gemaakt tussen hoge en lage afvoercondities met betrekking tot de morfologische ontwikkeling van een nevengeul in samenhang met achterliggende processen.

Alleen tijdens lage afvoercondities ontstaat er eenduidige afvoer- en sedimentverdeling op het splitsingspunt. Indien zich tijdens deze afvoercondities sedimentatie voordoet in de nevengeul dan zal dit sediment hoofdzakelijk bestaan uit grof sediment. Juist dit type sediment, dat via bodemtransport wordt getransporteerd, kan tijdens lage afvoercondities scheef worden verdeeld naar de afvoerdeling en waarbij dus te veel sediment naar de nevengeul getransporteerd kan worden. Dit als gevolg van spiraalstroming die ontstaat door centrifugale- en drukkrachten in een bochtige rivier en/of door kromming van het water naar de nevengeul (het Bulle Effect). Het Bulle Effect zal naar verwachting klein zijn wanneer nevengeulen relatief weinig debiet onttrekken. Ook dwarshellingen en bodemvormen nabij het splitsingspunt kunnen de sedimentverdeling sterk beïnvloeden.

Tijdens hogere afvoercondities bestaat er geen eenduidige afvoer- en sedimentverdeling meer op het splitsingspunt. Tijdens deze afvoercondities ontstaat er mede een sediment flux van de rivier (snel stromend) naar de uiterwaarden (langzaam stromend). Een deel van dit sediment wordt direct afgezet in de uiterwaarden naast het zomerbed in vorm van oeverwallen. In hoeverre deze afzettingen ook worden afgezet in een nevengeul is afhankelijk van de oriëntatiehoek. De stroomsnelheid in een nevengeul zal verlaagd worden wanneer de nevengeul een grote oriëntatiehoek maakt met de stroombanen van de uiterwaardstroming. Als gevolg van een lagere stroomsnelheid zal de transportcapaciteit van sediment ook afnemen, waardoor juist in deze typen nevengeulen (met grote oriëntatiehoek) veel sedimentatie kan optreden. De oriëntatiehoek speelt dus een belangrijke rol bij rivieren zoals de Waal, die veel sediment transporteren tijdens hogere afvoercondities. Echter de stroombanen van de uiterwaardstroming kunnen per locatie sterk verschillen, waardoor het niet mogelijk is, om op basis van dit onderzoek, hierover eenduidige uitspraken te doen.

De instroom van sediment naar nevengeul kan gereduceerd worden door:

- ligging instroomopening van nevengeul in eind buitenbocht (spiraalstroming);
- kleine bifurcatiehoek (kleinere kromming in relatie met het Bulle Effect);
- zo klein mogelijke debiet onttrekking (primaire waterstroming in samenhang met Bulle Effect).

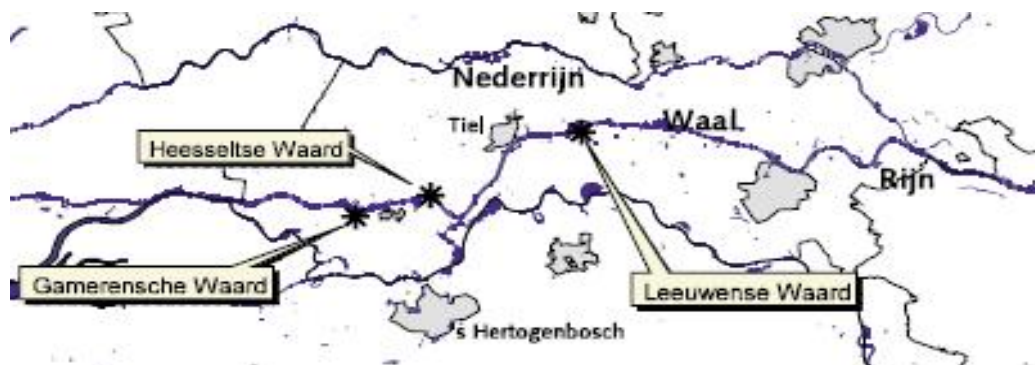
De sedimenttransportcapaciteit van nevengeul kan verhoogd worden door:

- een groter verhang in de nevengeul leidt tot een grotere debietonttrekking (tijdens lage afvoeren);
- kleine oriëntatiehoek met stroombanen van de uiterwaardstroming (tijdens hoge afvoeren).

De morfologische ontwikkeling (sedimentatie) van een nevengeul kan vertraagd worden door zowel de sedimenttransportcapaciteit te verhogen en/of door de instroom van sediment te verlagen. Merk op dat veranderingen in het debiet (transportcapaciteit) naar een nevengeul altijd gepaard gaan met veranderingen in het sedimentaanbod aan een nevengeul. Afhankelijk waarin de verandering het grootst is zal bepalen of de morfologische ontwikkeling wordt vertraagd of juist wordt versneld en vraagt dus om meer inzicht in de kwantitatieve sedimentverdelingsprocessen. Door drempelconstructies wordt de morfologische ontwikkeling vertraagd doordat de nevengeul minder vaak mee stroomt. In hoeverre deze constructies ook de sedimentinstroom naar de nevengeul reduceren is nog niet bekend.

3.5 Morfologische evaluatie bestaande nevengeulen

Tot op heden zijn alleen de nevengeulen Opijnen, Beneden Leeuwen en de nevengeulen van de Gamerensche Waard gemonitord. De nevengeulen Opijnen, Beneden Leeuwen en de nevengeulen van Gameren zijn allemaal gelegen in de rivier de Waal, zie figuur 6.



figuur 6: Hier zijn de locaties van de nevengeulen Beneden Leeuwen (Leeuwense Waard), Opijnen (Heesseltse Waard) en de nevengeulen Gameren (Gamerensche Waard) weergegeven. Uit: Wolters (2001).

Onderstaand worden de morfologische evaluaties van deze nevengeulen geanalyseerd. Verder worden hierbij de nevengeulen gekarakteriseerd op lengteverhouding, bifurcatiehoek en ligging in de rivier die kwalitatief afgeleid kunnen worden vanaf luchtfoto's. Hierbij is de lengte verhouding de verhouding tussen de lengte van de nevengeul met de lengte van de hoofdgeul (in- en uitstroomopening van nevengeul). De nevengeul heeft dus een relatief laag verhang wanneer de lengte verhouding groter is dan 1. Met de ligging wordt bedoeld of nevengeul in een binnen of een buitenbocht ligt. De oriëntatiehoek kan echter niet vanaf de luchtfoto's worden afgeleid.

Nevengeulen: Beneden Leeuwen

Lengte verhouding: $\gg 1$

Bifurcatiehoek: speelt geen rol, wordt gereguleerd door een duiker.

Ligging: binnenbocht



Luchtfoto nevengeul Beneden Leeuwen

Bij de nevengeulen van Beneden Leeuwen is bovenstrooms een grote sedimentvang geplaatst, zie luchtfoto. Vervolgens stroomt het water stroomafwaarts via een duiker naar een stelsel van permanent en periodieke stromende nevengeulen, die weer uitmonden in de Waal. Uit de "Evaluatie nevengeulen Opijnen en Beneden Leeuwen 1993 – 1998" geschreven door Simons, Bakker & Sorber (2000) blijkt dat de nevengeulen van Beneden Leeuwen morfologisch stabiel zijn. Door de grote sedimentvang wordt er hoofdzakelijk sedimentarm water naar de nevengeulen getransporteerd. Om deze reden treedt er geen tot weinig sedimentatie op in de nevengeulen. Doordat de ondergrond van de nevengeulen uit cohesief materiaal bestaat (kleiachtig materiaal)

treedt er ook weinig tot geen erosie op in de nevengeulen. Alleen benedenstrooms van de duiker kan er lichte erosie optreden, doordat de stroomsnelheid hier hoog genoeg kan oplopen om cohesief materiaal te eroderen. Dit sediment wordt echter gelijk benedenstrooms weer afgezet.

Nevengeul Opijnen

Lengte verhouding: > 1

Bifurcatiehoek: ± 90 graden door kribvakken

Ligging: buitenbocht



Luchtfoto nevengeul Opijnen

In Opijnen is een nevengeul aangelegd door vijf kribvakken af te sluiten met een strekdam, waarbij twee oude kribvakken zijn doorgestoken, zie luchtfoto. Uit de "Evaluatie nevengeulen Opijnen en Beneden Leeuwen 1993 – 1998" geschreven door Simons, Bakker & Sorber (2000) blijkt dat de nevengeul Opijnen morfologisch stabiel is. Dat er relatief weinig sediment naar de nevengeul stroomt, kan deels verklaard worden doordat de instroomopening in een buitenbocht is geplaatst en dat de nevengeul gemiddeld maar 1 procent van de totale afvoer onttrekt aan de Waal. Hierdoor wordt er relatief sedimentarm water naar de nevengeul getransporteerd en is de stroomsnelheid in de nevengeul beperkt. Bovendien zijn de in- en uitstroomopeningen van deze nevengeul voorzien van drempelconstructies, waardoor het bodemtransport naar de nevengeul extra wordt belemmerd. Tijdens hoogwatersituaties treedt er een lichte sedimentatie op van zand en slib op de oevers van de nevengeul. Tijdens lagere afvoeren treedt er weer lichte erosie op als gevolg van de afwisseling tussen de smalle en brede doorstroomprofielen in de nevengeul, zie ook de driehoeksformatie van het doorstroomprofiel in de luchtfoto. Uit de metingen die gedaan zijn in het kader van "Evaluatie nevengeulen Opijnen en Beneden Leeuwen 1993 – 1998" geschreven door Simons, Bakker & Sorber (2000) blijkt dat de erosie en sedimentatie ongeveer aan elkaar gelijk is, waardoor de nevengeul morfologisch vrijwel stabiel is.

Nevengeulen van Gameren

Lengte verhouding:

- Grote Geul: $>> 1$
- Oost-Geul: > 1
- West-Geul: > 1

Bifurcatiehoek: ± 90 graden door kribvakken

Ligging: buitenbocht

- Grote Geul: begin buitenbocht
- Oost-Geul: begin buitenbocht
- West-Geul midden buitenbocht



Luchtfoto van nevengeulen in Gameren

De Gamerensche Waard bestaat uit drie nevengeulen: Oost (2 ha), West (5 ha) en een Grote Geul (12,6 ha). De Oost-Geul en de West-Geul zijn periodieke geulen (drempels) en de Grote-Geul is permanent watervoerend (geen drempel). Wel bevat de Grote-Geul een brugconstructie met als functie om de afvoer tijdens hoogwatersituaties naar deze geul te beperken en te zorgen voor goede bereikbaarheid naar de Oost en de West-Geul. Ook is er benedenstrooms in de Grote-Geul een sedimentvang aangelegd. Uit de monitoring van Jans (2004) blijkt in de nevengeulen zowel sedimentatie als erosie plaats te vinden. De instroomopeningen van de drie nevengeulen zijn gelegen in de buitenbocht. Wel liggen de instroomopeningen van de Grote en de West-Geul in het begin van de buitenbocht. In de Waal wordt er nog relatief veel sediment langs deze instroomopeningen (Grote en Oost-Geul) getransporteerd, doordat de spiraalstroming op deze locaties nog niet volledig ontwikkeld is. Netto sedimentatie van slib treedt hoofdzakelijk alleen benedenstrooms op in de sedimentvang van de Grote-Geul. Onderstaand worden de drie nevengeulen meer gedetailleerd bestudeerd op de morfologische ontwikkeling die beschreven staan in Breen & Havinga (2003) en in het morfologische evaluatierapport van Gameren Jans (2004):

Grote-Geul

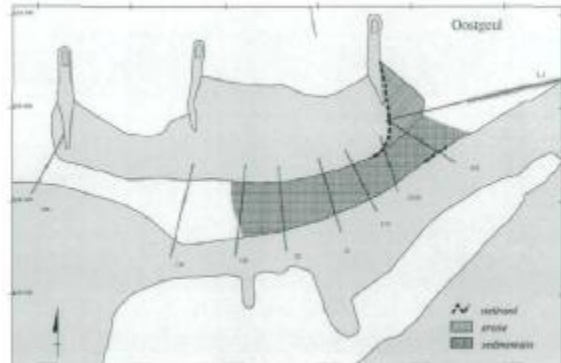
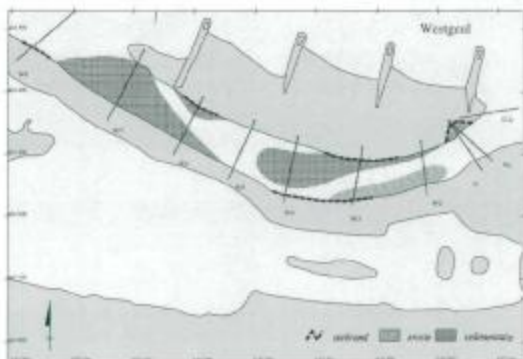
- benedenstrooms van de instroomopening treedt er linker oevererosie op. Doordat het kribvak vol in de stroombanen ligt van de hoofdgeul vindt de stroming met name plaats langs de linkeroever. Ook vindt hier een overgang plaats van onverdedigde naar verdedigde oever;
- bovenstrooms van de brug treedt erosie op. Als gevolg van de vernauwing is de stroomsnelheid hier groter waardoor erosie ontstaat;
- benedenstrooms van de brug treedt sedimentatie op doordat de nevengeul hier geleidelijk breder wordt en daarom zakt de stroomsnelheid;
- benedenstrooms van de brug treedt linker oevererosie op als gevolg van een neer die ontstaat door de vernauwing van de brug.

Oost-Geul

- van het begin tot halverwege de geul zijn er zandafzettingen die zich langzaam stroomafwaarts uitbreiden richting de uitstroomopening van de nevengeul, zie figuur 7;
- de drempel van de Oost-Geul is zowel bovenstrooms als benedenstrooms volledig bedekt met zand;
- oevererosie bij kribwortel, rechts van de instroomopening van de Oost-Geul, zie figuur 7.

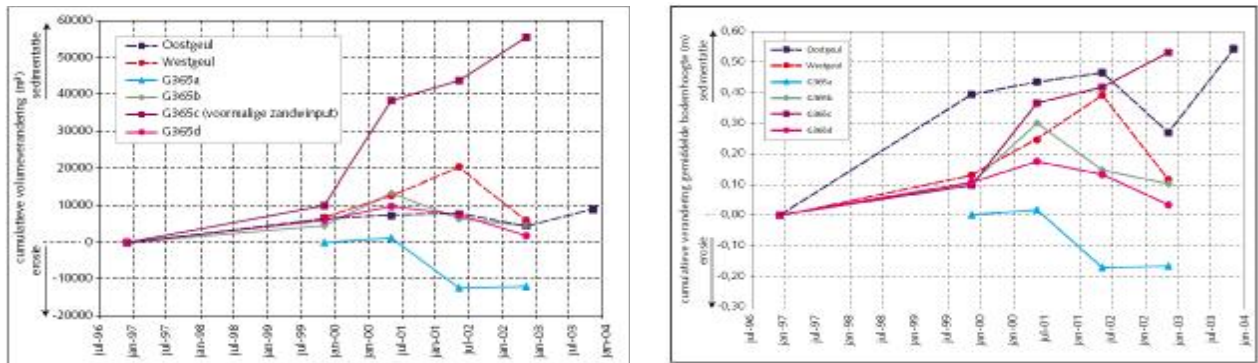
West-Geul

- rechteroever erosie (rivierzijde) in kribvak (in mindere mate dan bij de Oost-Geul), zie figuur 7;
- erosie bij de drempel dat achterloopsheid van de drempel heeft veroorzaakt. Door deze achterloopsheid stroomt de West-Geul vaker mee met de Waal;
- linkeroever erosie bovenstrooms van de uitstroomopening;
- aanzanding in de geul op verschillende plekken in vorm van alternerende banken;
- erosie tussen een benedenstroomse kribvak. Dit heeft te maken met het feit dat er voorheen in dit kribvak een opening is geweest naar de zandwinningsplas. In Breen & Havinga (2003) wordt als reden opgegeven dat hier minder stevig materiaal is gebruikt om deze opening op te vullen. Hierdoor treedt er alleen op deze plaats erosie op.



figuur 7: in de figuur (rechts) is de aanzanding (sedimentprop) in de Oost-Geul schematisch weergegeven. De aanzanding treedt zowel bovenstrooms als benedenstrooms op van de drempel. In de figuur (links) is de aanzanding (zandbank / alternerende zandbanken) van de West-Geul schematisch weergegeven. Uit: Jans (2000)

In de periode 1996 – 2003 zijn de bodemniveaus van de drie nevengeulen in verschillende perioden gemeten. In figuur 8 wordt de cumulatieve volumeverandering weergegeven voor de drie nevengeulen ten opzichte van december 1996. Hierbij wordt de Grote-Geul in vier secties opgesplitst. In appendix H is de volumeverandering per periode weergegeven door de meetpunten lineair met elkaar te verbinden. In figuur 8 wordt de cumulatieve verandering in de gemiddelde bodemhoogte aangegeven ten opzichte van de aanvangshoogte van de verschillende nevengeulen. Door Jans (2004) wordt vastgesteld dat er vermoedelijk een meetfout is gemaakt in de meting van de gemiddelde bodemhoogte in de periode juli 2002 – januari 2003 voor de Oost-Geul. Uit figuur 8 blijkt namelijk dat de bodemhoogte plotseling afneemt, terwijl eind 2003 de bodemhoogte weer helemaal hersteld is. Bovendien was er in deze periode geen sprake van een extreem hydrologisch nat jaar, waardoor de grote hoeveelheid erosie niet aannemelijk is. Dezelfde redenering geldt voor de West-Geul. Echter van deze nevengeul zijn er geen verdere metingen beschikbaar van de gemiddelde bodemhoogte na januari 2003. Hierdoor is het niet te bepalen of er in deze nevengeul ook herstel in de gemiddelde bodemhoogte is opgetreden.



figuur 8: In de linker figuur is de cumulatieve volume verandering van de nevengeulen van Gameren weergegeven. In de rechter figuur is de cumulatieve verandering van de gemiddelde bodemhoogte van de nevengeulen van Gameren weergegeven Uit Jans (2004).

Interpretatie monitoring gegevens

Uit figuur 8 kan een globaal beeld verkregen worden met welke snelheid nevengeulen op korte termijn kunnen sedimenteren. Echter bij deze monitoring gegevens kunnen wel een aantal kanttekeningen worden geplaatst:

- er zijn relatief weinig bodemmetingen verricht waardoor er geen goed onderscheid kan worden gemaakt tussen situaties van lage en hoge afvoer op de morfologische ontwikkeling;
- de morfologische ontwikkeling van deze nevengeulen worden beïnvloed door de interactie tussen deze drie nevengeulen. Om deze reden kan de morfologische ontwikkeling van deze nevengeulen niet goed vergeleken worden met een situatie waarbij één nevengeul aangelegd is.

Door Jans (2004) is globaal vastgesteld dat de gemiddelde bodemhoogte in de periodieke nevengeulen (Oost-Geul en de West-Geul) met 0,08 meter per jaar toeneemt. De gemiddelde bodempeil stijging van de permanente nevengeul (Grote Geul) wordt globaal vastgesteld op 0,05 (ondiepere delen) tot 0,11 (diepere delen) meter per jaar.

Daarnaast lijkt het dat de Oost-Geul min of meer een evenwicht heeft bereikt, doordat de sedimentatiesnelheid in de nevengeul, in de tijd gezien steeds verder afneemt. Dit heeft te maken dat de instroom van sediment en de transportcapaciteit van steeds dichterbij elkaar komt te liggen wanneer een nevengeul een evenwicht nadert. Uit dit onderzoek blijkt later dat de lengte van de nevengeul een grote invloed heeft op de morfologische ontwikkeling van de nevengeul (zie paragraaf 5.6.1 en paragraaf 9.4). Het effect van de nevengeullengte (verhang) op de evenwichtsdiepte is wel afhankelijk van de sedimentverdeling. In situaties waarbij weinig sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd geeft een kleinere nevengeullengte juist een verlaging van de evenwichtsdiepte. Uit paragraaf 7.2.1 is juist gebleken dat de morfologische ontwikkelingen van Gameren globaal vertaald kunnen worden naar een sedimentverdeling waarbij een kleinere nevengeullengte juist tot een grotere evenwichtsdiepte leidt. Een grote evenwichtsdiepte leidt tot een lager evenwichtsbodempeil. Dit lijkt ook de verklaring te zijn waarom er in de andere nevengeulen van Gameren, die relatief een langere nevengeullengte hebben, nog geen evenwichtsdiepte of bodempeil hebben bereikt.

3.5.1 Conclusie morfologische analyse bestaande nevengeulen

Met de nevengeulen van Gameren is meer inzicht verkregen in hoe de morfologische ontwikkeling van nevengeulen kan verlopen. Erosie van nevengeulen bestaat vooral uit afslag van oevers, waarbij plaatselijk ook een verdieping (uitschuring) van de geul kan ontstaan. Uitschuring van de geulbodem vindt hoofdzakelijk plaats bij versmallingen, waardoor de stroomsnelheden in de nevengeul lokaal kunnen toenemen. Als gevolg van neren, na bijvoorbeeld een versmalling van het doorstroomprofiel, kan ook hevige erosie ontstaan aan de oever van een nevengeul. In brede gedeelten en in binnenbochten stroomt het water langzamer en kunnen er ondiepten of zandbanken ontstaan als gevolg van spiraalstroming, zie ook de West-Geul in figuur 7. Ook net na de instroomopening zal sediment (zand) bezinken, doordat de stroomsnelheid in de nevengeul lager is dan in de hoofdstroom. Hierbij ontstaat bovenstrooms een 'sedimentatiefront' in de nevengeul, die zich in verloop van tijd steeds verder stroomafwaarts beweegt, zie ook de Oost-Geul in figuur 7. Hieruit is goed te zien dat er zowel sedimentatie boven- als benedenstrooms van een drempelconstructie kan optreden. In deze situaties kunnen dwarshellingen bij de instroomopening van een nevengeul de morfologische ontwikkeling van een nevengeul vertragen. Sedimentatie van slib blijkt in de nevengeulen van Gameren niet grootschalig op te treden. Alleen in de sedimentvang in de Grote-Geul blijkt na een zekere periode netto sedimentatie van slib op te treden.

Uit de morfologische evaluaties blijken alleen de nevengeulen van Gameren, ondanks de drempelconstructie bij de periodieke nevengeulen, een gemiddelde sedimentatie van 0,08 meter per jaar te ondervinden. Wel blijkt de Grote Geul met geen drempelconstructie meer sedimentatie te ondervinden dan de periodieke nevengeulen. Echter door de interactie tussen deze drie nevengeulen kan de invloed van een drempelconstructie niet goed geëvalueerd worden. Verder kunnen deze morfologische ontwikkelingen een verkeerd beeld geven ten opzichte van situaties waarbij één nevengeul is aangelegd. In vergelijking met nevengeul Opijnen kunnen deze ontwikkelingen verklaard worden doordat de nevengeulen van Gameren in begin- en midden buitenbocht zijn aangelegd en relatief een langere nevengeullengte hebben. Met nevengeul Beneden Leeuwen kan niet goed vergeleken worden doordat hier bovenstrooms een sedimentvang is aangelegd. Dit voorkomt dat er sedimentrijk water naar de nevengeul wordt getransporteerd waardoor hier eerder erosie verwacht kan worden. Echter door het onttrekken van een beperkte afvoer (duiker), in combinatie met het feit dat de ondergrond uit cohesief materiaal bestaat, blijkt voldoende te zijn om erosie in de nevengeulen van Beneden Leeuwen te voorkomen. De nevengeulen van Beneden Leeuwen zijn dus ook morfologisch stabiel. Nevengeul Opijnen is morfologisch iets actiever maar door aanleg in eind buitenbocht en door de relatief kleine lengte van de nevengeul is ook deze nevengeul vrijwel morfologisch stabiel. In ieder geval zal deze nevengeul niet op korte termijn (dicht) sedimenteren.

Kortom het aanleggen van nevengeulen in eind buitenbocht in samenhang met drempelconstructies en relatieve kleine debiet onttrekkingen lijkt de sedimentinstroom naar de nevengeul te verkleinen waardoor de morfologische ontwikkeling langzaam verloopt (zie ook 3.4.5). Ook blijkt de lengte van de nevengeul een grote invloed te hebben op de morfologische ontwikkeling. Wel is deze invloed afhankelijk van de sedimentverdeling. Bij Gameren lijkt de kleinere lengte (groter verhang) van de Oost-Geul de verklaring te zijn waarom deze Oost-Geul als eerste de evenwichtsdiepte lijkt te benaderen.

Toch blijven kwantitatieve sedimentverdelingen bij sedimenterende nog steeds onbekend. Het is daarom aan te bevelen om in de toekomst meer morfologische monitoringen uit te voeren bij sedimenterende solitaire nevengeulen. Bovendien kan hierdoor een beter beeld verkregen worden hoe de sedimentverdeling kwantitatief wordt beïnvloed door het ontwerp van een nevengeul.

4 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: evenwichtsmorfologie

De diepteligging van een nevengeul wordt hoofdzakelijk bepaald vanuit ecologische doelstellingen in verband met de frequentie van stroomvoerendheid. Door de frequentie af te lezen in de debiet-waterstand relatie van de rivier, op de locatie van de instroomopening van de nevengeul, kan de minimale diepteligging van de nevengeul bepaald worden. Deze methode is ook toegepast bij de nevengeulen van Gameren (RIZA, 1996). Met uitzondering van een geringe overdimensionering van nevengeulen, om enige sedimentatie en verhoging van de stromingsweerstand in de nevengeul toelaatbaar te maken, wordt er in het ontwerp geen rekening gehouden met morfologische evenwichtssituaties. Dit betekent dat wanneer een nevengeul onder zijn evenwichtsdiepte wordt aangelegd er ook veel sedimentatie kan plaatsvinden. Om deze reden wordt er in dit onderzoek gekeken hoe de ontwerpparameters van nevengeulen het morfologische evenwicht van een watersysteem beïnvloeden.

4.1 Doel en aanpak

Het sedimentaanbod aan een nevengeul wordt bepaald door een aantal verschillende processen (zie 3.4.4.), waarbij de invloeden van de processen o.a. weer worden beïnvloed door de geometrie en de ligging van de nevengeul. Tot op heden is het niet duidelijk hoe deze ontwerpparameters de morfologische ontwikkeling van een nevengeul beïnvloeden en op welke tijdschaal een nevengeul daadwerkelijk dicht kan sedimenteren. Deze kennis is wel van belang om te bepalen wanneer en bij welke nevengeulen sedimentbeheersende maatregelen in de toekomst nodig kunnen zijn. Om deze reden is er een analytische evenwichtsparаметrisatie gemaakt van twee watervoerende kanalen (Ribberink, 2008). Hiermee kunnen veranderingen van het evenwicht in het watersysteem, als gevolg van veranderingen in de geometrie in de nevengeul, in samenhang met verschillende sedimentverdelingen (bijvoorbeeld ligging) inzichtelijk worden gemaakt.

- Nevengeul geometrie-ontwerpparameters
 - o lengte van de nevengeul (L_2), breedte van de nevengeul (B_2) en stromingsweerstand van de nevengeul (C_2);
 - o aanlegdiepte van de nevengeul.
- Nevengeul sedimentverdeling ontwerpparameters
 - o ligging nevengeul (binnenbocht / buitenbocht);
 - o andere factoren zoals beschreven in paragraaf 3.4.3.

De sedimentverdeling ontwerpparameters bepalen in eerste instantie de hoeveelheid sediment dat naar de nevengeul getransporteerd zal worden. Dit verschijnsel kan later vertaald worden naar parameter 'Y' in de splitsingspuntrelatie, dat verder wordt besproken in paragraaf 4.6. Vervolgens bepalen de geometrie-parameters in eerste instantie de afvoer naar de nevengeul en de mate waarin het sediment daadwerkelijk getransporteerd kan worden. Hoewel de sedimentverdeling ontwerpparameters in eerste instantie de sedimentverdeling beïnvloeden, kunnen deze parameters ook, na enige morfologische ontwikkeling in de nevengeul de afvoerverdeling beïnvloeden. Omgekeerd geldt dit ook voor de geometrie-ontwerpparameters. Deze interactie is ook terug te vinden in de splitsingspunt relatie en in figuur 1.

Met de analytische parametrisatie kunnen alleen de evenwichtssituaties worden berekend, waarnaar een nevengeul zich morfologisch kan ontwikkelen. Het verloop van de morfologische ontwikkeling zelf en de tijdschaal waarop de deze evenwichtssituaties bereikt kunnen worden kan hiermee niet worden geanalyseerd. Om deze redenen is er voor gekozen om vergelijkbare situaties door te rekenen in het SOBEK-RE model (H7). Om de analytische resultaten goed te kunnen vergelijken met de numerieke resultaten uit het SOBEK-RE model is het noodzakelijk dat beide schematisaties gebruik maken van dezelfde uitgangspunten. Er is daarom een 'fitting-procedure' uitgevoerd, die er voor zorgt dat in beide analyses dezelfde hoeveelheid sediment door het watersysteem wordt getransporteerd in relatie tot een zekere afvoer.

Voordat de analytische resultaten worden beschreven volgt eerst een definitie van het begrip evenwicht en de beschrijving van het watersysteem. Daarna zal de methode van 'fitting-procedure' worden beschreven, gevolgd door de keuze en beschrijving van de gebuikte splitsingspuntrelatie in het onderzoek. Deze beschrijvingen zijn van groot belang bij de verdere interpretatie van de verkregen resultaten, waarbij de invloeden van ontwerpparameters (geometrie - en sedimentverdeling-parameters) geanalyseerd worden op de evenwichtssituaties.

4.2 Definitie en parametrisatie van evenwichtsmorfologie

De water-sedimentbeweging en het bodempeil zijn continu in interactie, waardoor het systeem in werkelijkheid een dynamisch karakter heeft. De verandering van het bodempeil op een bepaald punt in een kanaal, als gevolg van bodemtransport, kan met vergelijking (3) worden beschreven (Ribberink, 2006). In deze vergelijking is de verandering van het bodempeil gelijk aan de gradiënt van het sedimenttransport in de stromingsrichting van het kanaal, waarbij een negatieve gradiënt zorgt voor een toename van het bodempeil (sedimentaantbod is groter dan de transportcapaciteit).

$$(1 - e_p) \cdot \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Alleen onder stationaire condities kan het systeem een evenwicht bereiken, waarbij het evenwicht gedefinieerd wordt als “een situatie waarbij geen veranderingen optreden in de tijd”. Dit evenwicht kan dus alleen bereikt worden wanneer de in- en uitstroom van sediment in een kanaal aan elkaar gelijk zijn waardoor het bodempeil van een kanaal niet meer kan veranderen. De in- en uitstroom van sediment in een kanaal kan alleen maar aan elkaar gelijk zijn, wanneer de stroomsnelheid en de waterdiepte in de stromingsrichting van een kanaal constant zijn (Ribberink, 2006). Zo kan voor elk type kanaal, met een bepaalde in- en uitstroom van sediment en debiet, een evenwichtsdiepte en een evenwichtsverhang worden berekend met vergelijking (4) en (5).

$$he_i = m \cdot \frac{1}{n} \cdot Q_i \cdot B_i^{\frac{1-n}{n}} \cdot Q_{si}^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

$$ibe_i = \frac{Q^2}{C_i^2 \cdot he_i^3 \cdot B_i^2} \quad (5)$$

Uit vergelijking (4) volgt direct hoe de variabelen (debiet, breedte en sedimenttransport) doorwerken in de evenwichtsdiepte. Een toename in het debiet, kleinere stromingsbreedte en een afname in het sedimenttransport resulteren in een grotere evenwichtsdiepte.

Uit vergelijking (5) volgt direct hoe de variabelen (debiet, Chezy coëfficiënt, waterdiepte en de breedte van het kanaal) doorwerken in het evenwichtsverhang onder de randvoorwaarde dat de stroomsnelheid niet veranderd. Het evenwichtsverhang neemt toe wanneer de afvoercapaciteit van een kanaal toeneemt.

4.3 Analytische parametrisatie van het watersysteem

In dit onderzoek bestaat het watersysteem uit drie kanalen, respectievelijk de ‘moedergeul (i=0)’, ‘hoofdgeul (i=1)’ en de ‘nevengeul (i=2)’. De moedergeul is de geul die zich bovenstrooms bevindt van het splitsingspunt, het punt waarbij de moedergeul zich splitst in een hoofdgeul en een nevengeul (figuur 9 en figuur 25). In de analytische parametrisatie worden de kanalen geschematiseerd tot rechte kanalen met een gekozen lengte, uniforme breedte, ruwheid (Chezy coëfficiënt) en een rechthoekig dwarsprofiel. De water- en sedimentbewegingen naar de kanalen worden beschreven met de vergelijkingen (6) en (8). Door de massabalans wordt vereist dat het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul en de hoofdgeul gelijk is aan de moedergeul, zie ook de vergelijkingen (7) en (9).

Bij deze parametrisatie worden de volgende aannames gemaakt:

- in werkelijkheid zal een watersysteem vanwege zijn dynamische karakter nooit een evenwicht bereiken maar zal op lange termijn alleen een evenwicht naderen. Een rivier met een nevengeul in de praktijk hoeft dus niet dichtbij of in evenwicht te zijn waardoor de waterdiepte en verhang op dit moment heel anders kan zijn dan berekend vanuit deze theoretische evenwichtsbenadering;
- de evenwichtsbenadering is onafhankelijk van het initiële instroompeil van de nevengeul doordat alleen het evenwicht wordt berekend dat op lange termijn benaderd zal worden;
- in deze parametrisatie is de nevengeul niet voorzien van regulerende constructies bij de instroomopening en heeft dus een vrije instroom van water en sediment;

- de stromingsweerstand in de hoofdgeul en in de nevengeul wordt in deze parametrisatie onafhankelijk gesteld van de waterdiepte. In werkelijkheid varieert de stromingsweerstand met de waterdiepte;
- de moedergeul, hoofdgeul en nevengeul worden geschematiseerd in vorm van rechthoekige kanalen waarbij de stroomsnelheid uniform is over de breedte en de waterdiepte van het kanaal;
- sedimenttransport vindt plaats over de gehele breedte van het kanaal. In werkelijkheid hoeft dit niet zo te zijn.

Waterbeweging

$$Q_i = u_i \cdot h_i \cdot B_i = C_i \cdot \sqrt{h_i} \cdot i b_i \cdot h_i \cdot B_i = C_i \cdot h_i^{\frac{3}{2}} \cdot i b_i^{\frac{1}{2}} \cdot B_i \quad (6)$$

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (7)$$

Sedimentbeweging

$$Q_{si} = m \cdot u_i^n \cdot B_i = m \cdot \left(\frac{Q_i}{h_i \cdot B_i} \right)^n \cdot B_i = m \cdot Q_i^n \cdot h_i^{-n} \cdot B_i^{1-n} \quad (8)$$

$$Q_{s0} = Q_{s1} + Q_{s2} \quad (9)$$

Aan de hand van een knooppuntrelatie (splittingspuntrelatie) wordt beschreven hoeveel sediment naar de hoofdgeul respectievelijk naar de nevengeul wordt getransporteerd bij een bepaalde afvoerverdeling tussen beide kanalen, zie ook vergelijking (10). Deze splitsingspuntrelatie wordt in paragraaf 4.6 verder besproken.

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = F = X \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y = \left(\frac{B_{s1}}{B_{s2}} \right)^{1-Y} \cdot \left(\frac{g_1}{g_2} \right) \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y \quad (10)$$

Stel:

Index '0' = moedergeul

Index '1' = hoofdgeul

Index '2' = nevengeul

Q_i = debiet [m^3/s]

Q_{si} = sedimenttransport [m^3/s]

B_{si} = sedimenttransporterende breedte [m]

$L_{1,2}$ = lengte van hoofdgeul en respectievelijk nevengeul [m]

$i b_i$ = verhang [-]

h_i = waterdiepte [m]

C_i = Chezy coëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

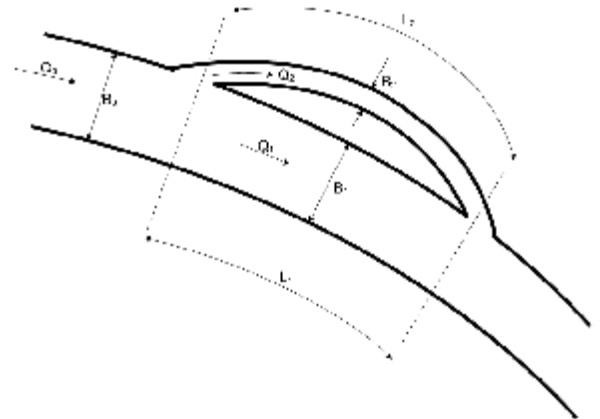
u_i = stroomsnelheid [m/s]

n = macht van de stroomsnelheid in de sediment transportformule [-]

m = coëfficiënt in de sedimenttransport formule [m]

X = vermenigvuldigingsfactor op de sedimentverdeling [-]

Y = macht van de sedimentverdeling in splitsingspuntrelatie [-]



figuur 9: Schematisatie van het watersysteem bestaande uit een moedergeul die zich vervolgens opsplijt in een hoofd- en een nevengeul met de bijhorende hoofdvariabelen. De sedimentverdeling op het knooppunt wordt beschreven door middel van een splitsingspuntrelatie.

4.4 Expliciete analytische oplossing van het watersysteem

Door de vergelijkingen (6), (7), (8) en (9) in elkaar over te schrijven, zie appendix I, kan er in het geval van de gekozen splitsingspuntrelatie (10) een expliciete oplossing gevonden worden voor de verhouding van de onbekende parameters ' h_{e1}/h_{e2} ', ' Q_1/Q_2 ', en ' Q_{s1}/Q_{s2} '. Daarnaast moeten de overige parameters ' Q_0 ', ' $i b_0$ ', ' Q_{s0} ', ' $B_{0,1}$ ', ' $C_{0,1}$ ', ' L_1 ' van de moeder- en hoofdgeul en te kiezen parameters voor de nevengeul ' L_2 ' ' C_2 ' en ' B_2 '

wel eerst bekend zijn. De parameters ‘m’ ‘n’ kunnen bepaald worden door middel van een ‘fitting’ procedure tussen de transportformule van het sediment van de analytische parametrisatie (power-law formule) en het 1D SOBEK-RE model (User-defined formule). Deze ‘fitting’ procedure wordt verder besproken in paragraaf 5.5 en in appendix J.

Wanneer alle onbekende parameters bekend zijn kunnen de verhoudingen van de onbekende parameters ‘ h_{e1}/h_{e2} ’, ‘ Q_1/Q_2 ’, en ‘ Q_{s1}/Q_{s2} ’ berekend worden met vergelijkingen (11), (12) en (13). De afleiding van deze evenwichtrelaties wordt beschreven in appendix I. Met deze verhoudingen kan het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul berekend worden met vergelijkingen (14) en (15). Vervolgens kan aan de hand van de massabalans, van zowel de water – en sedimentbeweging, het debiet en sedimenttransport naar de hoofdgeul berekend worden. Wanneer de water- en sedimentbeweging naar beide kanalen (nevengeul en hoofdgeul) zijn berekend kan de evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang van beide kanalen berekend worden met de vergelijkingen (14) en (15).

$$\frac{h_1}{h_2} = \left\{ \frac{1}{X} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{n-Y} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{n-Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-Y} \right\}^{\frac{2}{3-Y-n}} \quad (11)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left\{ \frac{1}{X^3} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^n \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{3-n} \right\}^{\frac{1}{3-Y-n}} \quad (12)$$

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left\{ \frac{1}{X^{\frac{n}{Y}}} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{2 \cdot n} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^n \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{3-n} \right\}^{\frac{Y}{3-Y-n}} \quad (13)$$

$$Q_2 = \left(1 + \frac{Q_1}{Q_2} \right)^{-1} \cdot Q_0 \quad (14)$$

$$Q_{s2} = \left(1 + \frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} \right)^{-1} \cdot Q_{s0} \quad (15)$$

4.5 Fitting procedure

Met de bovenstaande analytische parametrisatie kunnen alleen de evenwichtsituaties worden berekend waarnaar een nevengeul zich morfologisch kan ontwikkelen. Er kan hiermee niet worden geanalyseerd hoe de morfologische ontwikkelingen verlopen en op welke tijdschaal deze evenwichtssituaties bereikt kunnen worden. Deze inzichten zijn wel belangrijk om te bepalen of sedimenterende nevengeulen op korte termijn een probleem kunnen vormen met de veiligheidsdoelstellingen en wanneer eventueel (tijdelijke) sedimentbeheersende maatregelen moeten worden toegepast. Om deze redenen is er voor gekozen om vergelijkbare situaties door te rekenen in het SOBEK-RE model (H7). Echter in het Rijntakken model wordt een andere vergelijking gebruikt voor de berekening van het sedimenttransport. Hierdoor kunnen de verschillende resultaten niet goed met elkaar vergeleken worden. Om deze reden is er een ‘fitting procedure’ uitgevoerd die ervoor zorgt, dat ondanks dat de sedimenttransport vergelijkingen van elkaar verschillen, dezelfde hoeveelheid sediment door het watersysteem wordt getransporteerd in relatie tot een zekere afvoer. Voordat de ‘fitting’ procedure wordt beschreven wordt er eerst uitgelegd hoe het sedimenttransport in het Rijntakken model wordt berekend.

Sedimenttransport (Rijntakken model)

In het Rijntakken model wordt het sedimenttransport in ieder kanaal berekend met de “User-defined sediment transport formule”, zie de vergelijkingen (16), (17) en (18). In het Rijntakken model wordt met deze transportformule, zoals in een vorm van de sedimenttransport formule van Meyer-Peter-Müller, alleen het bodemtransport berekend. Bij dit type transportformule vindt er alleen in een kanaal sedimenttransport plaats wanneer een bepaalde stroomsnelheid bereikt wordt, om sediment in beweging te brengen, in relatie met de kritische bodemschuifspanning. Het voordeel van de “User-defined sedimenttransport formule”, ten opzichte van de transportformule van Meyer-Peter-Müller, is dat voor iedere kanaal een andere aanvangswaarde kan worden opgegeven wanneer sedimenttransport in het kanaal plaatsvindt. Ook kan er een correctiefactor (A) worden opgegeven waarmee het sedimenttransport gekalibreerd kan worden op de werkelijkheid. De ‘user-defined sedimenttransport formule’ in het Rijntakken model is gedefinieerd in vergelijking (16). De waarden voor de constanten parameters in deze vergelijking staan voor de Waal weergegeven in tabel 2:

$$Q_s = B_s \cdot \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot f \quad (16)$$

Hierin is:

Q_s = sedimenttransport [m^3/s]

B_s = sedimenttransporterende kanaal breedte [m]

g = acceleratie door zwaartekracht [m/s^2]

Δ = relatieve dichtheid van het sediment [-]

D_{50} = korrelgrootte [m]

Φ = transport parameter [-]

$$f = A \cdot \frac{1}{1 - e} \cdot b_u \cdot (m \cdot q_s - q_c)^{a_u} \quad (17)$$

met

$$q_s = m \cdot \frac{u^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}} \quad (18)$$

Hierin is:

θ_s = Shieldsparameter [-]

θ_c = kritieke Shields parameter [-]

A_i = correctie factor [-]

ε = porositeit [-]

μ = ripple factor [-]

u = stroomsnelheid [m/s]

C = Chezy coëfficiënt [$m^{1/2}/s$]

ε = porositeit sediment [-]

β_u = coëfficiënt [-]

α_u = coëfficiënt [-]

tabel 2: Gebruikte waarden voor de sedimenttransport vergelijking voor de Waal uit het Rijntakken model

Constante Parameters	Waarden in Waalsectie
A_i	0,8 [-]
$\alpha_u = c$	1,5 [-]
β_u	8 [-]
D_{50}	0,001 [m]
Δ	1,65 [-]
ε	0,4 [-]
g	9,81 [m/s^2]
μ	0,7 [-]
θ_c	0,025 [-]

Fitten ‘power-law’ transport formule op de ‘User-Defined’ transport formule van SOBEK

In de fitting procedure wordt de ‘power-law’ sedimenttransport formule (8) ‘gefit’ op de ‘User-Defined sedimenttransport formule’ van het Rijntakken model (16). Hiervoor moet de ‘User-Defined sedimenttransport formule’ omgeschreven worden naar vergelijking (19).

$$Q_s = B \cdot a(u^2 - b)^c \quad (19)$$

Het omschrijven van de ‘User-Defined transportformule’ naar vergelijking (19) en de methode van de ‘fitting procedure’ wordt verder beschreven in appendix J. Wat er feitelijk gebeurd in deze procedure is dat de ‘power-law’ sedimenttransport formule uit de analytische parametrisatie ‘lokaal’ gefit wordt, dit wil zeggen bij een bepaalde stroomsnelheid (afvoer), op de transportformule van SOBEK (User-Defined transportformule) aan de hand van de parameters ‘a’, ‘b’ ‘m’ en ‘n’. De parameters ‘a’ en ‘b’ kunnen worden uitgedrukt in vergelijking (20) en (21). Merk op dat de parameters ‘a’ en ‘b’ afhankelijk zijn van de Chezy coëfficiënt (niet constant), die opvolgend weer afhankelijk is van de afvoer naar de moedergeul.

$$a = \frac{\left(\frac{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot A \cdot b_u}{(1-e)} \right)}{\left(m^{-1} \cdot C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50} \right)^c} \quad (20)$$

$$b = q_c \cdot m^{-1} \cdot C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50} \quad (21)$$

Aan de hand van de parameters ‘a’ en ‘b’ kan opvolgend de waarden van de parameters ‘m’ en ‘n’ van de ‘power-law’ sedimenttransport formule weer worden berekend, zie ook de vergelijkingen (22) en (23).

$$m = \frac{a \cdot (u_{fit}^2 - b)^c}{u_{fit}^n} \quad (22)$$

$$n = \frac{2 \cdot c}{\left(1 - \frac{b}{u_{fit}^2} \right)} \quad (23)$$

Op deze manier kunnen bij verschillende stroomsnelheden en dus bij verschillende afvoeren naar de moedergeul, in de analytische parametrisatie, nieuwe waarden voor ‘m’ en ‘n’ berekend worden. Op deze manier gaat er in de analytische studie de juiste hoeveelheid sediment op transport door de moedergeul bij een bepaalde afvoer gerelateerd aan het Rijntakken model. Een overzicht van de berekende waarden ‘m’ en ‘n’ bij verschillende afvoeren door de moedergeul is weergegeven in tabel 3, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen parameters die uit het Rijntakken model zijn gehaald en de parameters die in de ‘fitting procedure’ berekend zijn. De andere benodigde waarden staan weergegeven in tabel 2 die tevens ook uit het Rijntakken model zijn gehaald.

tabel 3: Waarden van ‘n’ en ‘m’ bij verschillende afvoeren door moedergeul Q_0

<i>Parameters uit Rijntakken model</i>					<i>Parameters berekend</i>			
Q_0 [m^3/s]	B_{s0} [m]	Q_{s0} [m^3/s]	C_0 [$m^{1/2}/s$]	$u_0=u_{fit}$ [m/s]	a [s]	b [m^2/s^2]	n [-]	m [m]
1000	298	0,008	53	0,83	7,97E-05	1,66E-01	3,95	6,29E-05
1500	298	0,02	49	0,98	1,02E-04	1,40E-01	3,51	8,14E-05
2000	298	0,043	46	1,11	1,25E-04	1,22E-01	3,33	1,03E-04
3000	298	0,11	42	1,38	1,58E-04	1,05E-01	3,17	1,37E-04
4000	298	0,17	43	1,58	1,54E-04	1,06E-01	3,13	1,36E-04
4500	298	0,19	43	1,66	1,52E-04	1,08E-01	3,12	1,34E-04

De berekende waarden van ‘m’ en ‘n’ kunnen weer gecontroleerd worden met vergelijking (24). Het berekende sedimenttransport moet met deze vergelijking weer gelijk zijn aan de hoeveelheid sedimenttransport dat in het Rijntakken model optreedt.

$$Q_{s0} = B_{s0} \cdot m \cdot u^n \quad (24)$$

Afbakening onderzoek tot alleen bodemtransport

In het Rijntakken model wordt het sedimenttransport berekend met vergelijking (16). Met deze ‘user-defined’ sediment transportformule in vorm van Meyer-Peter- Müller wordt het totale sedimenttransport (bodemtransport + suspensie transport) in de Rijntakken berekend. Wel is deze transportformule gericht op dominant bodemtransport. Juist tijdens lagere afvoercondities kan het sediment dat via bodemtransport wordt getransporteerd scheef worden verdeeld naar de afvoerverdeling als gevolg van de sedimentverdelings processen (paragraaf 3.4.1). Om deze reden kan er verwacht worden dat juist dit type sediment wordt afgezet in de nevengeul tijdens lagere afvoercondities (paragraaf 3.4.5). Dit blijkt ook enigszins uit de monitoring van Gameren waarbij fijn sediment in suspensietransport hoofdzakelijk alleen maar netto wordt afgezet in de sedimentvang. Hoe dit zich echter verhoudt tot hogere afvoersituaties en in andere nevengeulen is nog niet goed bekend. In hoeverre dit de tijdschalen en de lange termijn ontwikkeling van de nevengeul beïnvloedt, hangt dus af of dit type sediment ook daadwerkelijk voor een relatieve lange periode netto wordt afgezet.

4.6 Keuze en gebruikte splitsingspuntrelatie in het SOBEK-RE model

De sedimentverdeling op knooppunten wordt in werkelijkheid beïnvloed, door de processen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven, waardoor 2D en 3D stromingspatronen een belangrijke rol spelen. In een 1D model kunnen alleen 1D stromingspatronen worden berekend waardoor een splitsingspuntrelatie noodzakelijk is om de sedimentverdeling bij knooppunten te kunnen beschrijven in een 1D model. In de literatuur zijn een aantal verschillende splitsingspuntrelaties beschreven uiteenlopend van complexe tot eenvoudige relaties. Ondanks de vele verschillende splitsingspuntrelaties die in het verleden zijn ontwikkeld, bestaat er toch nog steeds veel onzekerheid over de sedimentverdeling (Mosselman, 2001). Wel is inmiddels duidelijk uit welke parameters een splitsingspuntrelatie zou kunnen/moeten bestaan (van der Mark, 2004) zoals weergegeven in vergelijking (25). Deze parameters komen overeen met de processen zoals deze beschreven zijn in hoofdstuk 3. Deze processen kunnen weer vertaald worden naar de onderstaande parameters, wanneer de kwantitatieve effecten van deze parameters op de sedimentverdeling bekend zijn. Echter deze kwantitatieve effecten van deze parameters zijn momenteel nog niet bekend.

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = f\left(\frac{Q_1}{Q_2}, a_1, a_2, B_{s0}, B_{s1}, B_{s2}, 1/R, \frac{\partial z}{\partial y}, \text{maat sediment mobiliteit, afronding oever knik}\right) \quad (25)$$

Hierin is (index i = 1, 2, 3):

Q_{si} = sedimenttransport [m^3/s]

Q_i = debiet [m^3/s]

α_i = bifurcatiehoek [rad]

B_{si} = sedimenttransport breedte van een kanaal [m]

R_i = straal van de kromming van stroomlijnen [m]

$\frac{\partial z}{\partial y}$ = bodemdwarshelling [m]

In het SOBEK model zijn drie verschillende splitsingspuntrelaties beschikbaar waarmee de sedimentverdeling bij splitsingspunten mee beschreven kunnen worden, zie appendix M (Technical Reference: Morphology and Sediment Transport, 2005). Hierbij zijn de relaties gebaseerd op een afvoerverdeling tussen twee of meer watervoerende kanalen. In het onderzoek is er voor gekozen om de meest geavanceerde splitsingspuntrelatie in SOBEK te gebruiken waarbij de sedimentverdeling afhankelijk is van de afvoerverdeling in relatie tot een macht van parameter ‘Y’, zie ook vergelijking (10). Hiermee kan het sediment schever worden verdeeld naar de afvoerverdeling dan in vergelijking met de andere twee splitsingspuntrelaties. Dit in gedachtegang met dat de processen die beschreven zijn in paragraaf 3.4.1 juist voor een scheve sedimentverdeling kunnen zorgen en dus een belangrijk kenmerk vormt voor de morfologische ontwikkelingen in het watersysteem. Verder wordt in deze splitsingspuntrelatie de breedte van het kanaal (B_i) vervangen door de sediment transportbreedte van het kanaal (B_{si}). Deze kunnen, maar hoeven niet altijd, aan elkaar gelijk te zijn.

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = F = \left(\frac{B_{s1}}{B_{s2}}\right)^{1-Y} \cdot \left(\frac{g_1}{g_2}\right) \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^Y = X \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^Y \quad (10)$$

Hierin is:

F = sediment verdelingsfactor tussen hoofd- en nevengeul [-]

Y = machtsfunctie van de sedimentverdeling [-]

Q_i = debiet naar de hoofdgeul, respectievelijk de nevengeul [m^3/s]

B_{si} = sedimenttransporterende breedte van de hoofdgeul, respectievelijk nevengeul [m]

y_i = vermedigvuldigingsfactoren op het sedimenttransport naar de hoofdgeul, respectievelijk de nevengeul [-]

X = totale vermenigvuldigingsfactor op de sedimentverdeling [-]

Het sedimenttransport naar de nevengeul en hoofdgeul kan met deze splitsingspuntrelatie vervolgens berekend worden met vergelijking (27) en (28).

$$Q_{s1in} = \frac{F}{1+F} \cdot S_0 \quad (27)$$

$$Q_{s2in} = \frac{1}{1+F} \cdot S_0 \quad (28)$$

In deze splitsingspuntrelatie neemt het sedimenttransport, ongeacht de afvoerverdeling, naar de nevengeul toe (resp. af) naarmate parameter ‘Y’ kleiner (resp. groter) wordt (zie Appendix M). Alleen wanneer parameter ‘Y’ of wanneer de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) gelijk is aan 1, wordt het sediment proportioneel naar de afvoerverdeling verdeelt. Verder neemt het sedimenttransport naar de nevengeul toe, bij een zekere waarde voor parameter ‘Y’ wanneer het debiet naar de nevengeul toeneemt. Dit betekent dat er juist tijdens hogere afvoercondities, wanneer de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) kleiner wordt, relatief meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Deze verschijnselen staan in appendix M overzichtelijk weergegeven. Uit een gevoeligheidsanalyse, waarbij parameter Y gevarieerd is bij een drietal verschillende afvoerverdelingen, is gebleken dat er niet snel meer dan 10 procent van het totale sedimenttransport naar een ongelijkwaardige nevengeul getransporteerd zal worden. Dit voor een situatie waarbij de nevengeul niet meer dan 3 procent van de afvoer onttrekt tijdens geulvullende afvoercondities van de rivier.

Verder kan de sedimentverdeling worden beïnvloed door de factoren ‘ γ_1 ’, ‘ γ_2 ’. Onder deze factoren liggen geen fysische principes ten grondslag en zijn bedoeld om de sedimentverdeling te kalibreren wanneer de daadwerkelijke sedimentverdeling bekend is. Deze factoren komen afzonderlijk overeen met de correctiefactor ‘A’ die is opgenomen in de vergelijking van de transportparameter (17), die weer gebruikt wordt in de sedimenttransport vergelijking (16), zie ook de technical reference: morphology and sediment transport (2005). Om deze reden wordt parameter ‘ γ_1 ’, in de numerieke berekeningen die later gedaan worden in het SOBEK-RE model, gelijk gesteld aan 0,8. Dit omdat in het oorspronkelijke Rijntakken model A₁ (hoofdgeul en moedergeul) gelijk is aan 0,8 (tabel 2). Doordat het sedimenttransport naar de nevengeul niet bekend is wordt A₂ en ‘ γ_2 ’ gelijk gesteld aan 1.

In relatie met de sedimentverdelings-processen (h), kunnen de effecten van deze processen vertaald worden naar de parameters ‘Y’, ‘ γ_1 ’, ‘ γ_2 ’. Omdat ‘ γ_1 ’, ‘ γ_2 ’ calibratie factoren zijn worden de effecten van deze sedimentverdelings-processen alleen vertaald naar parameter ‘Y’. Echter doordat de kwantitatieve effecten van de sedimentverdelings-processen nog niet (volledig) beschreven zijn is het nog niet mogelijk om de waarde voor ‘Y’ nauwkeurig te bepalen. Wel kan op kwalitatieve inzichten gesteld worden dat parameter ‘Y’ relatief lager is voor situaties waarbij de nevengeul in een binnenbocht ligt dan wanneer de nevengeul in een buitenbocht ligt.

Uit eerder onderzoek is gebleken dat de morfologische ontwikkeling van twee waterlopen op lange termijn geheel wordt bepaald door de splitsingspuntrelatie (Wang et al, 1993 ; geciteerd in Ghimire, 2003). Om deze reden wordt in hoofdstuk 5 geanalyseerd hoe de splitsingspuntrelatie de morfologische ontwikkelingen van het watersysteem beïnvloedt. Verder wordt de keuze van de splitsingspuntrelatie (10) en gerelateerde invloeden hiervan besproken in hoofdstuk 10 in vorm van een discussie.

5 Stabiliteit & evenwichtsituaties in het watersysteem versus parameter 'Y'

In dit hoofdstuk worden de invloeden van parameter 'Y' (sedimentverdelingsprocessen) op de evenwichtsituaties van het watersysteem geanalyseerd. Ook worden de invloeden van de van de geometrieparameters (C_2 , L_2 en B_2) op de evenwichtssituaties geanalyseerd. Beide analyses worden uitgevoerd aan de hand van de (analytische) parametrisatie van het watersysteem zoals deze beschreven is in paragraaf 4.3. Om de resultaten goed te kunnen interpreteren moet er ook naar de stabiliteit van deze evenwichtssituaties gekeken worden.

In het verleden is al eerder een numerieke stabiliteitsanalyse uitgevoerd door Wang et al (1993, geciteerd in van der Mark, 2004). Uit deze analyse komen drie typen eindsituaties naar voren die het watersysteem kan bereiken in zijn morfologische ontwikkeling en deze worden als eerste beschreven in dit hoofdstuk. Daarna volgt een beschrijving van een standaardcase, waarbij de variabelen van het watersysteem gedefinieerd worden. Vervolgens worden de evenwichtsituaties gerelateerd aan parameter 'Y' vergeleken met de numerieke stabiliteitsanalyse van Wang et al (1995). Tot slot worden de invloeden van de geometrieparameters (C_2 , L_2 en B_2) op de evenwichtssituaties geanalyseerd bij verschillende sedimenteren. Hieruit volgt waar sedimentatie van nevengeulen verwacht kan worden.

5.1 Stabiliteit analyse Wang et al (1995)

De morfologische stabiliteit van twee gelijkwaardig aangetakte benedenstroomse kanalen (dezelfde aanlegdiepte), in samenhang met een splitsingspuntrelatie zoals weergegeven in vergelijking (10), is door Wang (1995) in een morfologisch model (ESTMORF) in het verleden bestudeerd. Hierbij is telkens als uitgangssituatie gehanteerd dat beide kanalen in de initiële situatie open zijn. Uit dit onderzoek is gebleken, afhankelijk van de parameter 'Y', dat zich drie typen eindsituaties kunnen voordoen in het watersysteem:

- Situatie 1: beide benedenstroomse kanalen blijven open en transporteren een bepaalde hoeveelheid debiet en sediment;
- Situatie 2: alleen kanaal 1 blijft open en al het debiet en sediment van de moedergeul wordt naar kanaal 1 getransporteerd;
- Situatie 3: alleen kanaal 2 blijft open en al het debiet en sediment van de moedergeul wordt naar kanaal 2 getransporteerd.

Uit deze numerieke analyse is gebleken, dat bij een kritieke waarde van de parameter Y uit de splitsingspuntrelatie, zich een overgang vormt tussen (situatie 1) en (situatie 2 en situatie 3). De overgang van situatie 2 en situatie 3 blijkt af te hangen van de initiële afvoerverhouding (Q_1/Q_2) gerelateerd aan de breedteverhouding (B_1/B_2).

Wanneer de kanalen geschematiseerd worden als rechthoekige kanalen, waarbij het sedimenttransport over de gehele kanaalbreedte plaatsvindt, kan de kritieke waarde van 'Y' berekend worden met vergelijking (29). Hierbij geldt dat beide kanalen open blijven wanneer $Y > n/3$ (situatie 1) en dat één van de takken open blijft wanneer $Y < n/3$ (situaties 2 en 3).

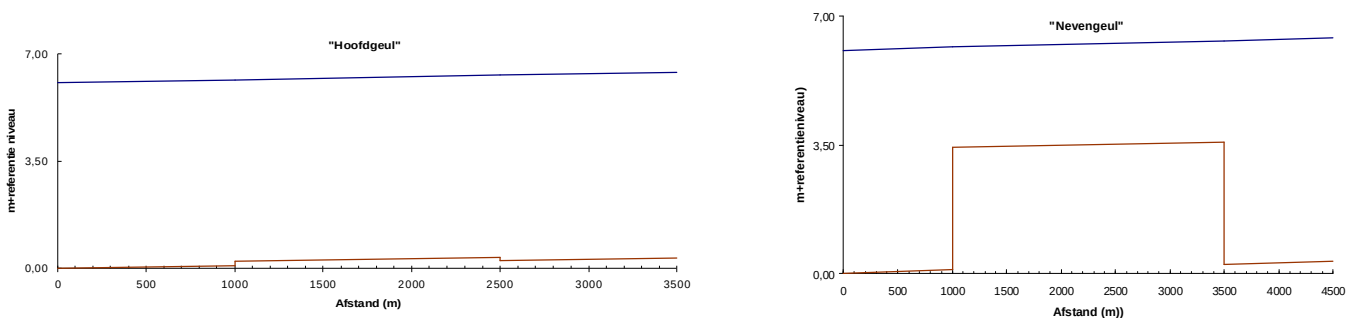
$$Y = \frac{n}{3} \quad (29)$$

Deze stabiliteitsrandvoorwaarde kan eveneens worden verkregen uit de analytische vergelijkingen die zijn opgesteld voor het watersysteem zoals beschreven in paragraaf 4.3. Het afleiden van vergelijking (29) wordt verder beschreven in appendix K en in paragraaf 5.4.

5.2 Beschrijving Standaardcase

Er wordt hier een standaardcase beschreven om een referentiebeeld te vormen welke evenwichtsdiepte en welk evenwichtsverhang bereikt wordt in de nevengeul/hoofdgeul, bij een geulvullende afvoer van rondom de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ghimire, 2003). In deze standaardcase worden de parameters ' $C_{1,2}$ ' en ' $B_{1,2}$ ' voor de 'moedergeul' en 'hoofdgeul' aan elkaar gelijk gesteld en is de lengte van de nevengeul groter dan de lengte van de hoofdgeul. Verder wordt de Chezy-coëfficiënt van de nevengeul in de standaardcase gelijk gesteld aan de hoofd- en moedergeul. Hieronder worden de waarden weergegeven die aan de variabelen van het watersysteem zijn toegekend (figuur 10) en worden de waarden zoveel mogelijk uit het Rijntakken model overgenomen om de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen. De waarden voor de parameters ' m ' en ' n ' zijn bij een geulvullende afvoer gelijk aan 3,33 en respectievelijk $1,03\text{E-}04$ (tabel 3). De waarden voor ' Y ', ' y_1 ' en ' y_2 ' zijn zo gekozen dat er een 'sedimentatiefront' ontstaat in de nevengeul en dat er minder dan 3 procent van de totale afvoer aan de hoofdgeul wordt onttrokken. In onderstaand overzicht zijn de waarden weergegeven berekend voor ' h_{e1} ', ' h_{e2} ', ' ib_{e1} ' en ' ib_{e2} ' en is ook een schematisatie weergegeven van het evenwicht dat ontstaat in de hoofdgeul en in de nevengeul.

Omschrijving standaardcase	Symbool	Waarde	Eenheid
Debiet naar de moedergeul	Q_0	2000	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Breedte moedergeul	B_0	298	$[\text{m}]$
Chezy coëfficiënt moedergeul	C_0	45,57	$[\text{m}^{1/2}/\text{s}]$
Bodemverhang moedergeul	ib_0	0,00011	$[-]$
Sedimenttransport moedergeul	Q_{s0}	0,043	$[\text{m}^3/\text{s}]$
Coëfficiënt 'fitting procedure'	a	$1,25\text{E-}4$	$[\text{s}]$
Coëfficiënt 'fitting procedure'	b	$1,22\text{E-}1$	$[\text{m}^2/\text{s}^2]$
Coëfficiënt sedimenttransport (power-law)	n	3,33	$[-]$
Coëfficiënt sedimenttransport (power-law)	m	$1,03\text{E-}4$	$[\text{m}]$
Breedte hoofdgeul	B_1	298	$[\text{m}]$
Lengte hoofdgeul	L_1	1500	$[\text{m}]$
Chezy coëfficiënt hoofdgeul	C_1	45,57	$[\text{m}^{1/2}/\text{s}]$
Breedte nevengeul	B_2	30	$[\text{m}]$
Lengte nevengeul	L_2	2500	$[\text{m}]$
Chezy coëfficiënt nevengeul	C_2	45,57	$[\text{m}^{1/2}/\text{s}]$
Macht in sedimentverdeling	Y	2	$[-]$
Calibratie factor sedimenttransport hoofdgeul	y_1	1	$[-]$
Calibratie factor sedimenttransport nevengeul	y_2	2	$[-]$
Resultante vermenigvuldigingsfactor	X	0,05	$[-]$
Evenwichtsituatie in het watersysteem			
Hoofdgeul	Q_1	1952,30	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	Q_{s1}	$4,25\text{E-}02$	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	h_{e1}	5,94	$[\text{m}]$
	ib_{e1}	$9,85\text{E-}05$	$[-]$
Nevengeul	Q_2	47,70	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	Q_{s2}	$5,04\text{E-}04$	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	h_{e2}	2,74	$[\text{m}]$
	ib_{e2}	$5,91\text{E-}05$	$[-]$



figuur 10: schematisatie van het gevonden evenwicht in het watersysteem met de toegekende waarden zoals weergegeven in bovenstaande tabel.

5.3 Analytische evenwichtsituaties van het beschreven watersysteem

In deze paragraaf worden de effecten van parameter ‘Y’ (sedimentverdelingsprocessen) op de evenwichtssituaties van het watersysteem geanalyseerd. Het maakt voor deze analyse niet uit of de nevengeul ongelijkwaardig of gelijkwaardig is aangetakt aan de rivier. Dit komt omdat in deze analyse alleen de eindstadia van de morfologische ontwikkelingen in het watersysteem worden berekend aan de hand van de analytische evenwichtsbenadering. Voor het verloop van de morfologische ontwikkelingen en het tijdsbestek waarin deze evenwichtssituaties worden bereikt speelt de aantakking (instroompeil) van de nevengeul op de rivier wel een belangrijke rol. Verder worden de waarden van de variabelen, die bekend worden verondersteld in het watersysteem, uit de standaardcase overgenomen. Alleen de waarden van de parameters ‘ γ_1 ’, ‘ γ_2 ’ worden hier gelijk gesteld aan 1, omdat aan deze parameters geen fysische principes ten grondslag liggen en immers calibratie factoren in het SOBEK-RE model zijn. Door het weglaten van deze calibratie factoren wordt parameter ‘X’ alleen nog maar bepaald door de relatieve breedte van de hoofdgeul en nevengeul, die vervolgens weer afhankelijk is van een bepaalde machtsfunctie van parameter ‘Y’, zie ook vergelijking (10). Hierdoor is alleen parameter ‘Y’ een te kiezen constante die de sedimentverdeling beïnvloedt en onafhankelijk is van de geometrie van het watersysteem.

De evenwichtsdiepte in de hoofd- en nevengeul kunnen worden berekend met vergelijkingen (4), (12), (13), (14) en (15). De evenwichtsdiepte verhouding kan berekend worden met vergelijking (11).

$$\frac{h_{e1}}{h_{e2}} = \left\{ \frac{1}{X} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{n-Y} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{n-Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-Y} \right\}^{\frac{2}{3Y-n}} \quad (11)$$

Indien een waarde van ‘Y’ wordt gekozen die gelijk is aan ‘Y’ = n/3 wordt er in de analytische parametrisatie geen antwoord gevonden, omdat de machtsfunctie in vergelijking (11), (12) en (13), notitie Ribberink (2008), gelijk is aan nul. In deze situatie is de afvoer- en sedimentverdeling, tussen de nevengeul en hoofdgeul gelijk aan nul (hoofd- en nevengeul staan droog), waardoor er voor beide kanalen geen evenwichtsdiepte kan worden berekend.

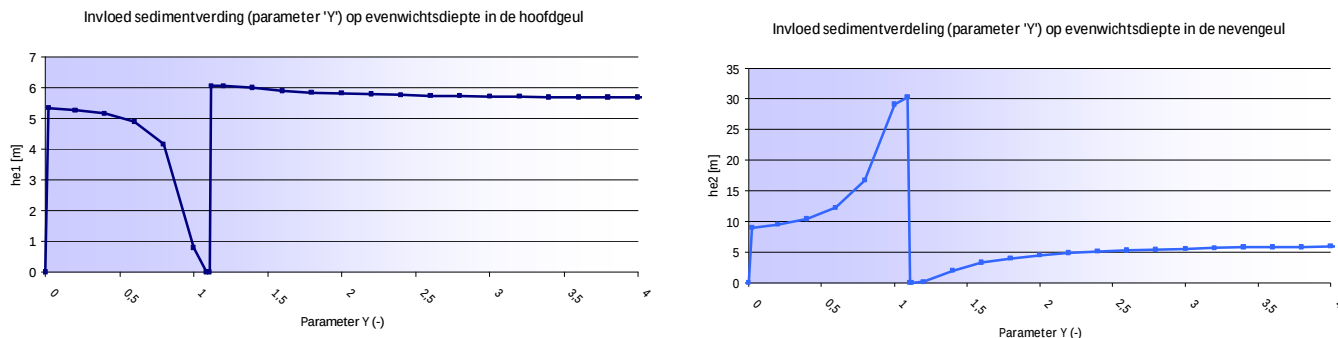
Indien ‘Y’ iets groter is dan de kritieke waarde (in dit geval $Y = 1,11$ met $Y_{crit} = 3,33/3$) wordt er een evenwicht bereikt, waarbij de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is ($h_{e2}=0$), zie figuur 11. In deze evenwichtssituatie wordt de totale afvoer en sediment van de moedergeul naar de hoofdgeul getransporteerd. Indien parameter ‘Y’ groter wordt volgt direct uit de splitsingspuntrelatie (10) dat het sedimentaanbod naar de nevengeul (resp. hoofdgeul) afneemt (resp. toeneemt), zie ook Appendix L. Hierdoor neemt in de evenwichtssituatie de evenwichtsdiepte in de nevengeul toe en neemt de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul af (figuur 11). Het gevolg is dat de stroomsnelheid in de nevengeul (resp. hoofdgeul) zal worden verlaagd (resp. verhoogd) en de verhouding van de sedimenttransportcapaciteit weer gelijk zal worden aan de verhouding van het sedimentaanbod. Doordat de breedte van de nevengeul veel kleiner is dan de breedte van de hoofdgeul zijn de veranderingen in de evenwichtsdiepte van de nevengeul groter dan in die van de hoofdgeul.

Indien de evenwichtssituaties onderling worden vergeleken dan is het belangrijk om op te merken dat het sedimenttransport naar de nevengeul (resp. hoofdgeul) juist toeneemt (resp. afneemt). Naar een kanaal neemt het debiet en sedimenttransport juist toe (resp. af), wanneer de evenwichtsdiepte groter (resp. kleiner) wordt.

Indien ‘Y’ iets kleiner is dan de kritieke waarde (in dit geval $Y = 1,11$ met $Y_{crit} = 3,33/3$) wordt er een evenwicht bereikt, waarbij de hoofdgeul volledig dicht gesedimenteerd is ($h_{e1}=0$), zie figuur 11. In deze evenwichtssituatie wordt de totale afvoer en het sediment van de moedergeul naar de nevengeul getransporteerd. Dit volgt ook uit de vergelijkingen (12) en (13), waarbij de afvoer- en sedimenttransportverhouding zeer klein worden. Uit de vergelijking (14) en (15) volgt dat het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul zeer groot moet worden. Indien parameter ‘Y’ kleiner wordt volgt direct uit de splitsingspuntrelatie (10) dat het sedimentaanbod naar de nevengeul (resp. hoofdgeul) toeneemt (resp. afneemt), zie ook Appendix L. In evenwichtssituatie neemt hierdoor de evenwichtsdiepte in de nevengeul af en neemt de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul toe (figuur 11). Dit weer om de stroomsnelheid in de nevengeul (resp. hoofdgeul) te verhogen (resp. te verlagen) zodat het sedimentaanbod weer gelijk wordt aan sedimenttransportcapaciteit.

In figuur 11 is dus duidelijk te zien dat parameter ‘Y’, uit splitsingspuntrelatie (10), een grote invloed heeft op de uiteindelijke (analytische) evenwichtssituaties die bereikt kunnen worden in het watersysteem. De grootste

veranderingen in het watersysteem, met betrekking tot de evenwichtssituaties, treden op rondom de kritieke waarde van parameter 'Y'. Met andere woorden, de sediment- en afvoerverdeling rondom de kritieke waarde van parameter 'Y' is zeer variabel, waardoor het watersysteem dan zeer gevoelig is voor een evenwichtsverandering. Naarmate parameter 'Y' steeds groter of kleiner wordt, neemt de gevoeligheid voor verandering in de evenwichtsituatie van het watersysteem af (figuur 11).



figuur 11: In deze figuren is de relatie van parameter 'Y' op de evenwichtsdieptes in de hoofdgeul en op de nevengeul weergegeven waarbij parameters ' γ_1 ' en ' γ_2 ' gelijk zijn aan 1. Verder wordt er een afvoer van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ door de moedergeul getransporteerd met een sedimenttransport (Q_{s0}) van $0,043 \text{ m}^3/\text{s}$ en waarbij parameter 'n' gelijk is aan 3,33. Wanneer 'Y' iets kleiner is dan $n/3$ is in de linker figuur te zien dat de hoofdgeul volledig dicht gesedimenteerd is ($he_1 = 0$). Wanneer 'Y' iets groter is dan $n/3$ is in de linker figuur te zien dat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is ($he_2 = 0$). Wanneer 'Y' nog groter of kleiner wordt dan $n/3$ neemt de evenwichtsdiepte verhouding (he_1/he_2) af. De overige karakteristieken van het watersysteem staan beschreven in de standaardcase (figuur 10). Merk op dat de evenwichtsdiepte in figuur 11, bij een Y-waarde van 2, niet gelijk is aan de berekende evenwichtsdiepte in de standaardcase omdat in deze analyse de parameters γ_1 en γ_2 gelijk zijn 1.

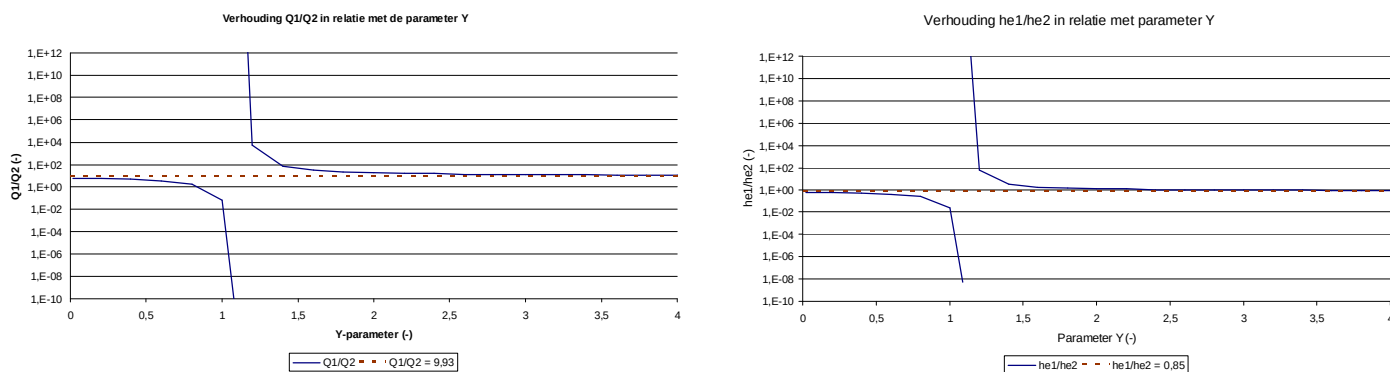
Indien 'Y' veel groter of kleiner wordt dan de kritieke waarde (in dit geval ligt de kritieke waarde op $Y = 1,11$) gaat de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) richting de breedteverhouding (B_1/B_2) van de hoofd- en nevengeul. In deze situatie is de breedteverhouding B_1/B_2 gelijk aan 9,93 (298/30), zie figuur 12. Wanneer de afvoerverdeling gelijk is aan 9,93 dan is de he_1/he_2 verhouding ongeveer gelijk aan 0,85 zie ook figuur 12. In deze situatie kunnen de onderstaande limieten onderscheiden worden:

$$\lim_{Y \rightarrow +\infty} f(Y) = 0,85$$

$$\lim_{Y \rightarrow -\infty} f(Y) = 0,85$$

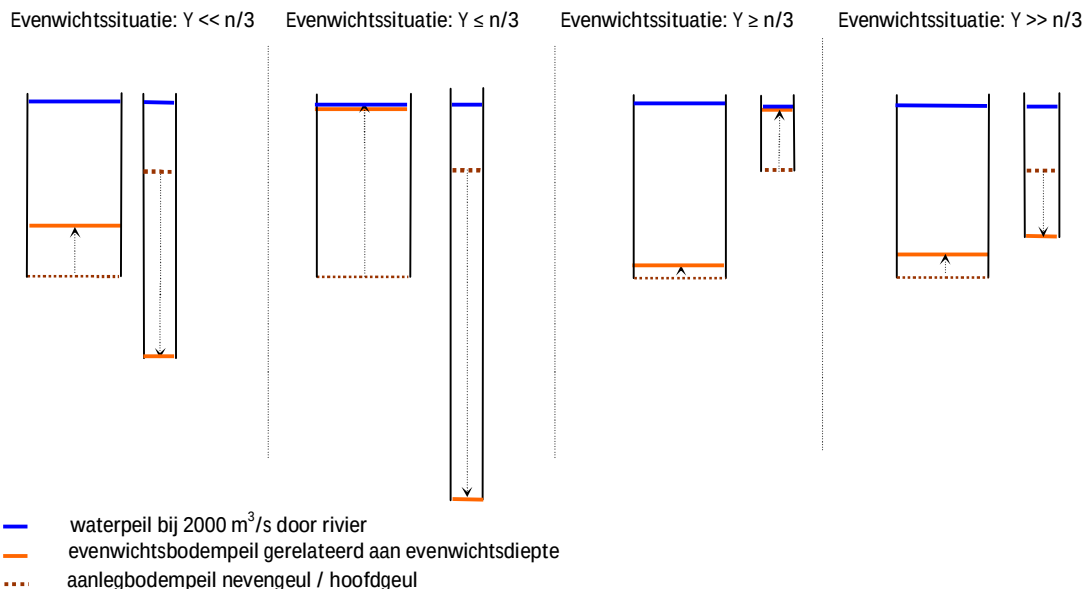
$$\lim_{Y \uparrow 1,11} f(Y) = +\infty$$

$$\lim_{Y \downarrow 1,11} f(Y) = -\infty$$



figuur 12: In deze figuren is de debietverhouding (Q_1/Q_2) en sedimenttransport verhouding (Q_{s1}/Q_{s2}) in relatie met parameter 'Y' weergegeven waardoor de limieten in deze verhoudingen overzichtelijk kunnen worden weergegeven.

De schematisaties in figuur 13 kunnen verkregen worden indien de gevonden evenwichtsdieptes uit figuur 11 gerelateerd worden aan een evenwichtsbodempeil met een waterpeil behorend bij een afvoer van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ door de moedergeul. Hier is te zien dat het evenwichtsbodempeil van de nevengeul juist laag is in situaties waarbij $Y < n/3$ en relatief hoog kan zijn in situaties waarbij $Y > n/3$. Indien wordt verondersteld dat de waterdiepte in de nevengeul gering is, doordat deze ongelijkwaardig is aangetakt op de rivier, dan zal de nevengeul juist in situaties waarbij $Y > n/3$ (sterk) kunnen sedimenteren. In de overige gevallen kan de nevengeul eroderen. Om te achterhalen of het watersysteem zich morfologisch ook daadwerkelijk naar deze evenwichtsdieptes toewerkt, moet er naar de stabiliteit van deze gevonden evenwichtssituaties gekeken worden. Dit wordt gedaan in paragraaf 5.4



figuur 13: wanneer de evenwichtsdieptes uit figuur 11 gekoppeld worden aan een evenwichtsbodempeil, gerelateerd aan een waterpeil bij een afvoer van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ door de moedergeul, kunnen de volgende evenwichtssituaties geschematiseerd worden. Hierbij wordt verondersteld dat de nevengeul ongelijkwaardig is aangetakt aan de rivier. Hierbij betekent '≥' net iets groter want $Y = n/3$ geeft geen oplossing.

5.4 Interpretatie gevonden analytische evenwichtssituaties in relatie met stabiliteitsanalyse

Uit de evenwichtsanalyse (analytisch) met betrekking tot parameter 'Y' (paragraaf 5.3) kan het volgende worden waargenomen:

- nevengeul sedimenteert dicht ($h_{e2} = 0$) wanneer Y iets groter is dan $n/3$;
- hoofdgeul sedimenteert dicht ($h_{e1} = 0$) wanneer Y iets kleiner is dan $n/3$;
- nevengeul en hoofdgeul blijven beide open (h_{e1} en $h_{e2} \neq 0$) wanneer Y groter of kleiner is dan $n/3$;
- wanneer $Y_{(a)} \gg Y_{\text{crit}} \ll Y_{(b)}$ dan is Q_1/Q_2 gelijk aan B_1/B_2 en $h_{e1(a)}/h_{e2(a)} = h_{e1(b)}/h_{e2(b)}$ (dit geldt alleen wanneer γ_1 en γ_2 gelijk zijn aan 1).

Uit deze waarnemingen kan worden geconcludeerd dat bij twee verschillende sedimentverdelingen; a) $Y =$ groot (veel sedimenttransport naar de hoofdgeul), b) $Y =$ klein (veel sediment transport naar de nevengeul), dezelfde evenwichtsdiepteverhouding tussen de hoofdgeul en nevengeul wordt bereikt. Dit komt omdat de massabalans van de water- en sedimentbeweging gelijk blijft en het totale debiet en sedimenttransport door het watersysteem niet verandert.

Het is opvallend in de analytische evenwichtsanalyse dat zowel voor situaties ($Y < n/3$) als voor situaties ($Y > n/3$) de hoofd- en nevengeul open blijven. Dit heeft te maken met het feit dat in de analytische evenwichtsparаметrisatie zich geen waterdiepteverstoringen voordoen, omdat in de analytische evenwichtsbepaling alleen de eindstadia van het morfologische evenwicht wordt berekend en het debiet en het sedimenttransport naar de hoofd- en nevengeul altijd constant blijft. Dit in tegenstelling tot de drie evenwichtssituaties zoals beschreven door Wang et al (1995). In deze numerieke analyse blijven alleen beide kanalen open bij $Y > n/3$. In situaties waarbij $Y < n/3$ zal dit altijd tot volledige sedimentatie van één kanaal leiden.

Dit verschijnsel kan verklaard worden uit de analyse van de stabiliteit van de 'verkregen analytische evenwichten' in samenhang met de waterdiepteverstoringen. Waterdiepteverstoringen kunnen bijvoorbeeld ontstaan, doordat er bij een zekere afvoer de ene keer meer of minder sediment door de rivier wordt getransporteerd. Wanneer in een watersysteem, dat zich in morfologisch evenwicht bevindt, een waterdiepteverstoring voordoet, dan zal de afvoer- en sedimentverdeling weer veranderen als gevolg van de

verandering in de waterdiepteverhouding (h_1/h_2), zie ook figuur 1. In het watersysteem kunnen er zich twee typen waterdiepteverstoringen voordoen:

- verstoring 1 leidt tot een grotere waterdiepteverhouding ($> h_1/h_2$) als gevolg van erosie in hoofdgeul (grotere h_1 in kanaal 1) en/of door sedimentatie in nevengeul (kleinere h_2 in kanaal 2);
- verstoring 2 leidt tot een kleinere waterdiepteverhouding ($< h_1/h_2$) als gevolg van sedimentatie in hoofdgeul (kleinere h_1 in kanaal 1) en/of door erosie in nevengeul (grotere h_2 in kanaal 2).

Afhankelijk van de stabiliteit van het evenwicht kunnen beide waterdiepteverstoring(en) hersteld worden in het watersysteem. De stabiliteit van een verkregen evenwicht kan geanalyseerd worden door onderscheid te maken tussen het: i) het sedimenttransport van de hoofd- en nevengeul, zie vergelijking (30), en ii) het sedimentaanbod aan de hoofd- en nevengeul bovenstrooms van het splitsingspunt, zie vergelijking (31). Het afleiden van deze vergelijkingen wordt beschreven in appendix K.

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{n/2} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right) \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^n \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{n/2} \quad (\text{sedimenttransportcapaciteit verhouding}) \quad (30)$$

$$\frac{Q_{s1in}}{Q_{s2in}} = X \cdot \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\frac{3Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^Y \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^Y \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{Y}{2}} \quad (\text{sedimentaantbod verhouding}) \quad (31)$$

Uit de machtsfunctie van de waterdiepteverhouding van vergelijking (30) en (31) is af te leiden dat de kritieke waarde van ‘Y’ berekend kan worden met $Y = n/3$.

Stabiele situaties

Uit de stabiliteitsanalyse, zoals beschreven in appendix K, leiden alleen situaties waarbij $Y > n/3$ tot stabiele evenwichtssituaties en waarbij beide waterdiepteverstoringen hersteld worden. Dit komt omdat deze situaties, ongeacht welke waterdiepteverstoring zich voordoet, altijd zal leiden tot een grotere toename (resp. afname) in de sedimentaantbodverhouding (Q_{s1in}/Q_{s2in}) dan de toename (resp. afname) in de sedimenttransportcapaciteit verhouding (Q_{s1}/Q_{s2}). Dit kan ook vertaald worden naar vergelijking (32).

$$\left| \frac{dQ_{sin}}{dQ} \right| > \left| \frac{dQ_s}{dQ} \right| \quad (\text{stabiele evenwichtssituatie}) \quad (32)$$

Dit verschijnsel kan in figuur 14 inzichtelijk worden gemaakt voor twee identieke kanalen waarbij een evenwicht wordt gevormd waarbij de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) gelijk is aan 1. In de evenwichtssituatie zijn sedimentaantbod (Q_{s1in}/Q_{s2in}) en de transportcapaciteit (Q_{s1}/Q_{s2}) verhoudingen ook gelijk aan 1. In dit geval leidt waterdiepteverstoring 1 (situatie A) en waterdiepteverstoring 2 (situatie B) altijd tot terugkeer naar het oorspronkelijke evenwicht (figuur 14). Andere rekenvoorbeelden zijn weergegeven in appendix K.

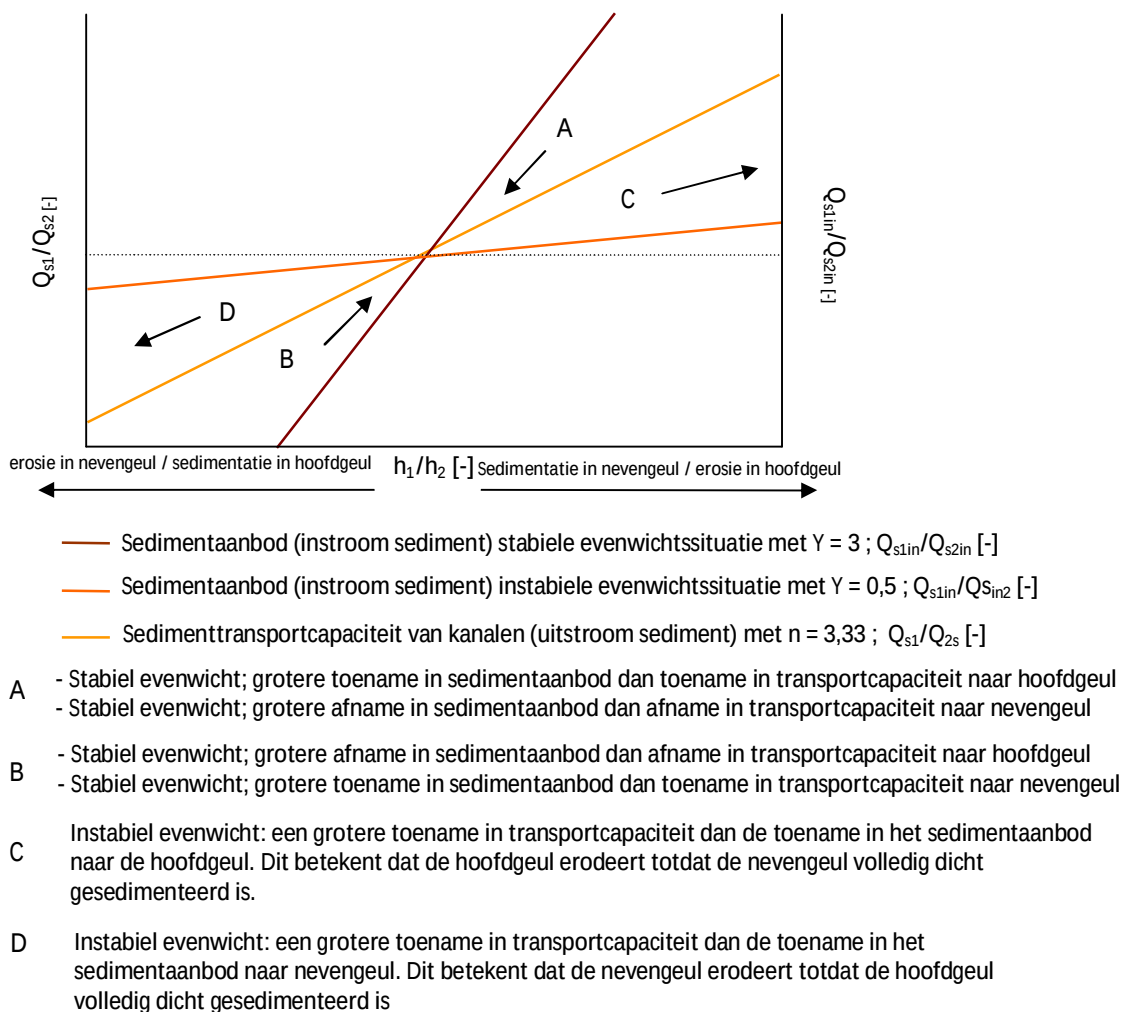
Instabiele situaties

Uit de stabiliteitsanalyse, zoals beschreven in appendix K, leiden situaties waarbij $Y < n/3$ tot instabiele evenwichtssituaties en waarbij beide waterdiepteverstoringen niet hersteld worden. Dit komt omdat deze situaties, ongeacht welke verstoring zich voordoet, altijd zullen leiden tot een kleinere toename (resp. afname) in de sedimentaantbodverhouding (Q_{s1in}/Q_{s2in}) dan de toename (resp. afname) in de sedimenttransportcapaciteit verhouding (Q_{s1}/Q_{s2}). Dit kan vertaald worden naar de vergelijking (33).

$$\left| \frac{dQ_{sin}}{dQ} \right| < \left| \frac{dQ_s}{dQ} \right| \quad (\text{instabiele evenwichtssituatie}) \quad (33)$$

In dit geval leidt waterdiepteverstoring 1 (situatie C) en waterdiepteverstoring 2 (situatie D) niet tot terugkeer naar het oorspronkelijke evenwicht (figuur 14). In dit geval wordt de waterdiepteverstoring voortgezet

waardoor één kanaal steeds sneller gaat eroderen totdat één kanaal volledig dicht gesedimenteerd is. Andere rekenvoorbeelden zijn weergegeven in appendix K.



figuur 14: Overzicht van de stabiliteitsanalyse voor twee identieke kanalen waarbij een evenwicht wordt gevormd waarbij de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) gelijk is aan 1. In evenwichtssituatie zijn sedimentaanbod (Q_{s1in}/Q_{s2in}) en de transportcapaciteit (Q_{s1}/Q_{s2}) verhoudingen ook gelijk aan 1. Wanneer deze verhoudingen groter (resp. kleiner) worden dan 1 dan wordt er teveel (resp. te weinig) sediment naar de hoofdgeul (resp. nevengeul) getransporteerd.

Deze instabiliteit, bij twee gelijkwaardige benedenstroomse aangetakte kanalen, is ook naar voren gekomen bij de morfologische stabiliteitsanalyse van Wang et al (1995), geciteerd in van der Mark (2004). Welk kanaal hierbij uiteindelijk volledig dicht sedimenteert, is afhankelijk van de B_1/B_2 en Q_1/Q_2 verhoudingen (van der Mark, 2004).

In geval van ongelijkwaardige nevengeulen ($B_2 < B_1$; $Q_2 < Q_1$) is het aannemelijk dat verstoring 1 zich voordoet in het watersysteem. Hierbij wordt de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) groter door sedimentatie in de nevengeul. Dit komt overeen met relatieve lage Y-waarden waarbij relatief veel sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd (Appendix L). Daarnaast is er in paragraaf 5.3 verklaard dat de evenwichtsdieptes van de nevengeulen zeer groot kunnen zijn bij instabiele situaties (figuur 11 en figuur 13). Dit betekent dat (ongelijkwaardige) nevengeulen al snel boven de evenwichtsdiepte worden aangelegd waardoor verstoring 1 geldig is. Dit betekent indien instabiele situaties zich voordoen in het watersysteem dat de hoofdgeul zal eroderen totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is. Dit verschijnsel bij instabiele situaties doen zich ook voor bij de numerieke berekeningen in het SOBEK-RE model (hoofdstuk 6).

De analytische evenwichtssituaties waarbij $Y < n/3$ zullen dus in de praktijk kortstondig bereikt worden indien:

- de nevengeul onder of op zijn evenwichtsdiepte is aangelegd;
- er zich in de praktijk altijd waterdiepteverstoringen zullen voordoen.

5.5 Morfologische stabiliteit: Splitsingspuntrelatie Kleinhans (2008)

Zoals eerder beschreven kunnen de processen bochtstroming, barvorming (bodenvormen), en dwarshellingen (hellingen die ontstaan door sedimentatieprocessen of door een nevengeul ongelijkwaardig aan te takken) een grote rol spelen op de sedimentverdeling naar twee of meerdere benedenstroomse kanalen van een splitsingspunt in een bochtige rivier (Kleinhans, 2008), zie ook de beschrijving van de splitsingspunt relatie in paragraaf 4.6. Natuurlijk zijn de invloeden van deze processen weer afhankelijk van de geometrie, ligging en aanlegdiepte (gelijk of ongelijkwaardig aangetakt) van benedenstroomse kanalen van het splitsingspunt. In de huidige splitsingspuntrelatie, zoals beschreven in vergelijking (10), kunnen de processen die de sedimentverdeling bepalen, bij een bepaalde afvoerverdeling, in principe alleen met de parameter 'Y' benaderd worden. Doordat deze parameters in de splitsingspuntrelatie (10) constant worden verondersteld, kunnen variaties in de sedimentverdeling tijdens de simulatieperiode alleen nog maar ontstaan door variaties in de afvoerverdeling. Om deze reden kunnen variaties in de effecten op de sedimentverdeling door spiraalstroming, bodenvormen en dwarshellingen, die vervolgens weer afhankelijk zijn van de stadia van de morfologische ontwikkeling van beide benedenstroomse kanalen, niet (goed) meegenomen worden.

Doordat parameter 'Y' een te kiezen constante is en niet op fysische principes af te leiden is, is door Kleinhans (2008) een nieuwe splitsingspuntrelatie opgesteld. Dit is gedaan door te veronderstellen dat parameter 'Y' in splitsingspuntrelatie (10) gelijk is aan 1. Hierdoor wordt het sediment in eerste instantie proportioneel verdeeld naar de afvoerverdeling tussen beide benedenstroomse kanalen (paragraaf 4.6). Vervolgens is door Kleinhans (2008) een correctiefactor toegepast. Met deze factor, bestaande uit fysische principes die rekening houdt met bochtstroming en dwarshellingen, kan de oorspronkelijk berekende evenredige sedimentverdeling gecorrigeerd worden. Deze fysische principes zijn vertaald naar parameters die berekend kunnen worden in het SOBEK-RE model. Op deze manier is de nieuwe splitsingspuntrelatie wel afhankelijk van de morfologische ontwikkelingsstadia van de benedenstroomse kanalen en zijn de invloeden van bochtstroming en dwarshellingen op de sedimentverdeling variabel. De correctiefactor van Kleinhans (2008) wordt verder beschreven in appendix N.

Doordat deze nieuwe splitsingspuntrelatie nog niet standaard is opgenomen in het SOBEK-RE model, kan deze relatie nog niet gebruikt worden bij de numerieke berekeningen die voor dit onderzoek in SOBEK zijn gemaakt. Wel is geprobeerd om deze splitsingspuntrelatie te gebruiken in de analytische studie, om te analyseren of de stabiliteit van het eerder beschreven watersysteem verbetert of verslechtert. Ook in de analytische evenwichtsbeschrijving van het watersysteem kan de correctiefactor echter niet gebruikt worden. Zoals hierboven beschreven kan de correctiefactor alleen gebruikt worden indien parameter 'Y' gelijk is aan 1. Doordat n altijd groter is dan 3 (tabel 3) betekent dit voor de analytische evenwichtsbeschrijving van het watersysteem dat er altijd sprake is van een instabiel evenwicht, ongeacht welke afvoer door de moedergeul getransporteerd wordt. In de analytische evenwichts-parametrisatie doen zich tevens geen verstoringen voor in de waterdiepteverhouding en derhalve leiden instabiele situaties tot hoge afvoeren en grote hoeveelheid sedimenttransport naar de nevengeul. Daarnaast sedimenteert de hoofdgeul bijna volledig dicht. Dit zijn geen werkelijke situaties die zich in de praktijk voordoen. Het vergroten van parameter 'Y' leidt in de analytische parametrisatie tot stabiele situaties. Wordt de correctiefactor dan nog eens bij de sedimentverdeling afgetrokken of opgeteld dan worden de invloeden van de processen op de sedimentverdeling overschat. Dit komt omdat de correctiefactor van Kleinhans (2008) niet meer geldig is zodra 'Y' groter is dan 1.

Een andere oplossing zou kunnen zijn om de parameter 'Y' in de analytische parametrisatie te vervangen door de correctiefactor. Dit is analytisch echter niet eenvoudig. Bovendien kunnen deze analytische resultaten niet vergeleken worden met de numerieke resultaten uit SOBEK. Deze oplossing valt dan ook buiten het kader van dit onderzoek. Het is in dit onderzoek dus niet gelukt om te bepalen of de stabiliteit van het eerder beschreven watersysteem verbetert of verslechtert met de splitsingspuntrelatie van Kleinhans.

5.6 Invloeden van de nevengeulparameters 'L₂', 'C₂' en 'B₂' op evenwichtsmorfologie

Met de evenwichts- en stabiliteitsanalyse (paragraaf 5.3 en 5.4) is inzichtelijk gemaakt hoe de sedimentverdeling(parameters), in relatie met parameter 'Y', de evenwichtssituatie van het watersysteem (nevengeul, hoofdgeul) beïnvloedt. Hierbij leidt een toename in parameter 'Y' tot minder sedimenttransport naar de nevengeul. Hierdoor wordt de evenwichtsdiepte in de nevengeul groter en wordt de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul kleiner. Verder is gebleken dat er een onderscheid kan worden gemaakt tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties. Alleen in stabiele evenwichtssituaties ($Y > n/3$) blijven zowel de hoofd- en nevengeul open. In instabiele evenwichtssituaties ($Y < n/3$) erodeert de hoofdgeul totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is. Bij elk van deze bovenstaande analyses is de geometrie van de nevengeul constant gehouden, dit wil zeggen een constante lengte (L₂), breedte (B₂) en stromingsweerstand (C₂) van de nevengeul, zie ook de standaardcase (figuur 10).

Beschrijving analyse

In deze analyse worden de invloeden van de geometrieparameters (C₂, L₂ en B₂) op de evenwichtsdieptes en evenwichtsverhang van de hoofd- en nevengeul geanalyseerd. Om te analyseren in hoeverre deze effecten kunnen verschillen wordt dit bepaald met verschillende sedimentdelingen (tabel 4). Verder worden deze karakteristieken geanalyseerd met een afvoer (Q₀) van 2000 m³/s en 0,043 m³/s sedimenttransport (Q_{s0}) naar de moedergeul waarbij n = 3,33 en m = 1,03E-04 meter.

tabel 4: Sedimentverdelingen in relatie met de geometrieparameters 'C₂', 'L₂' en 'B₂'

Case	Nevengeul parameter	Y [-]	v ₁ [-]	v ₂ [-]
A	L ₂	2	1	1
B	C ₂ , B ₂	2	1	5
C	L ₂ , C ₂ , B ₂	2	1	2
D	L ₂ , C ₂ , B ₂	5	1	2
E	L ₂ , C ₂ , B ₂	0,5	1	2

De evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang kunnen worden berekend met vergelijking (4) en (5).

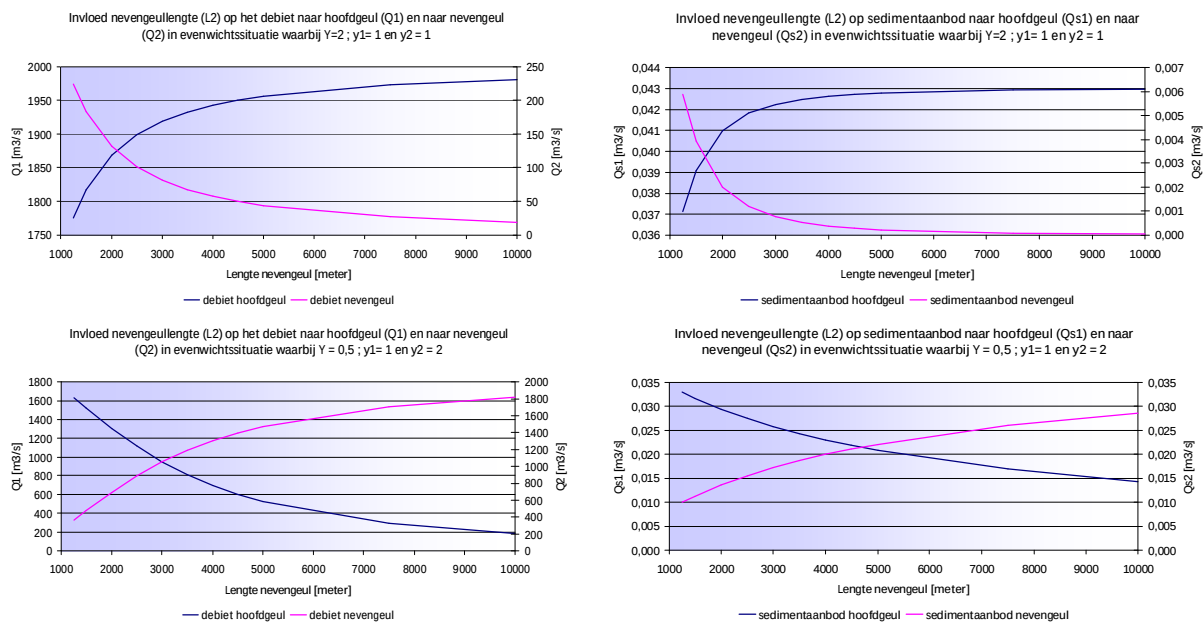
$$h_i = m^n Q_i B_i^{1-n} Q_{si}^{-1/n} \quad (4)$$

$$i_i = \frac{Q_i^2}{C_i^2 h_i^3 B_i^2} \quad (5)$$

Door variatie van de geometrieparameters 'C₂', 'L₂' en 'B₂' zal primair de afvoerverdeling veranderen. Als gevolg van verandering in de afvoerverdeling zal ook de sedimentverdeling veranderen door de splitsingspuntrelatie (10). Aangezien het hier gaat om evenwichtssituaties is het sedimenttransport altijd gelijk aan het sedimentaanbod (in- en uitstroom van sediment naar de hoofd- en nevengeul is aan elkaar gelijk). In dit geval zal een alleen grotere toename of een kleinere afname van de afvoer (stroomsnelheid) ten opzichte van de sedimenttransport-factor (Q_{si}^{-1/n}) naar een kanaal leiden tot verhoging van de evenwichtsdiepte, zie ook vergelijking (4). Merk op dat een toename (resp. afname) van de sedimenttransport-factor tot stand komt door een afname (resp. toename) van het sedimenttransport naar een kanaal. Tegenovergesteld zullen de evenwichtsdieptes verlaagd worden. Dit principe is ook geldig voor het evenwichtsverhang. Alleen nu moeten de veranderingen van het debiet vergeleken worden met de parameters 'C₂', 'h_{e2}', en 'B₂', zie ook vergelijking (5).

5.6.1 Invloed nevengeul ontwerpparameters ‘L₂’, ‘C₂’ en ‘B₂’ op evenwichtsmorfologie

De toe of afname van het debiet en ook het sedimenttransport naar de hoofd- en nevengeul, gerelateerd aan de nevengeullengte, is afhankelijk van het feit of er sprake is van een stabiel of instabiel evenwicht. In de gevallen van stabiele evenwichtssituaties ($Y > 1,11$) neemt het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul af, indien de lengte van het kanaal (L_2) toeneemt (figuur 15). Dit heeft te maken met een grotere lengte van de nevengeul, waardoor het verhang van de nevengeul lager wordt. Doordat het debiet naar de nevengeul afneemt, neemt ook het sedimenttransport naar de nevengeul af. Uit de massabalans (water en sedimentbeweging) volgt dan dat het debiet en het sedimenttransport naar de hoofdgeul moet toenemen. In instabiele situaties ($Y < n/3$) gebeurt het tegenovergestelde. In dit geval neemt zowel het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul toe, indien de lengte van de nevengeul groter wordt (figuur 15). Merk wel op dat de evenwichtsdieptes in de nevengeul in deze situaties veel groter zijn dan de evenwichtsdieptes van de hoofdgeul (figuur 11 en figuur 13). Onderstaand worden de effecten op de evenwichtsdiepte en op het evenwichtsverhang nader beschreven, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen stabiele en instabiele situaties.



figuur 15: In de bovenste grafieken (links en rechts) is weergegeven dat het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul afneemt in stabiele evenwichtssituaties ($Y > n/3$) met toenemende lengte van de nevengeul. In de onderste grafieken (links en rechts) is weergegeven dat het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul toeneemt in instabiele evenwichtssituaties ($Y < n/3$) met toenemende lengte van de nevengeul.

Stabiele evenwichtssituaties in relatie met de evenwichtsdiepte in het watersysteem

Stabiele evenwichtssituaties met een toenemende lengte van de nevengeul kunnen zowel leiden tot een grotere of tot een kleinere evenwichtsdiepte in de nevengeul. De toe of afname in de evenwichtsdiepte is afhankelijk van het gegeven dat parameter ‘Y’ kleiner of groter is dan parameter ‘n’. Het omslagpunt kan eenvoudig uit de machtsvergelijking in de L_1/L_2 verhouding in vergelijking (11) worden afgeleid.

$$\frac{h_1}{h_2} = \left\{ \frac{1}{X} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{n-Y} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{n-Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-Y} \right\}^{\frac{2}{3Y-n}} \quad (11)$$

Een grotere nevengeullengte (L_2) resulteert in een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul indien de sedimentverdeling ligt tussen $n/3 < Y < n$ (figuur 16 en figuur 17). Dit komt omdat bij deze sedimentverdelingen de afname in het debiet naar de nevengeul groter is dan de toename in de sedimenttransport-factor ($Q_{s1}^{-1/n}$). Omgekeerd geredeneerd is het de verklaring waarom de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul toeneemt. Deze verschijnselen zijn ook weergegeven in appendix R.

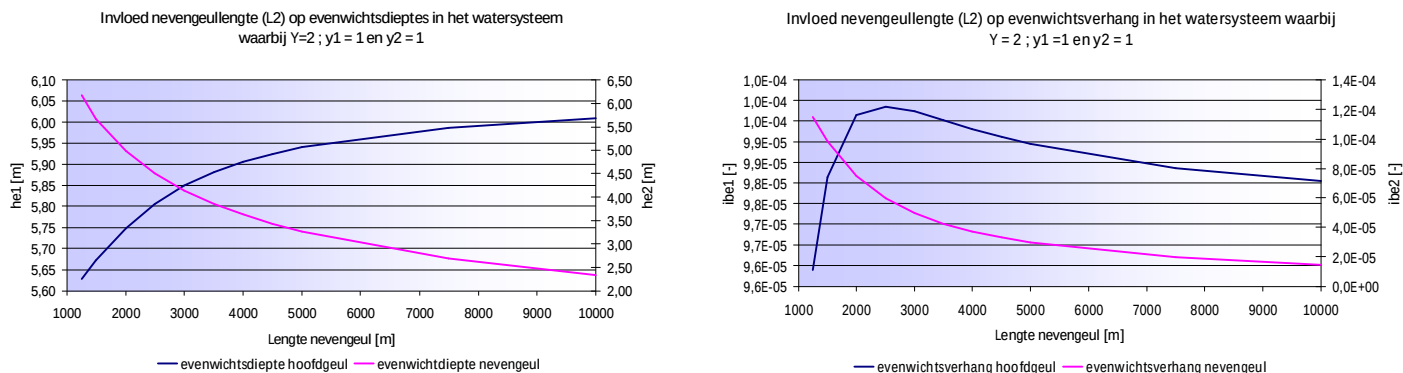
Een grotere nevengeullengte (L_2) resulteert in een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul indien $Y > n$ (figuur 18). Dit komt omdat in dit geval de afname in het debiet naar de nevengeul kleiner is dan de toename in de sedimenttransport-factor ($Q_{si}^{-1/n}$). Omgekeerd geredeneerd is het de verklaring waarom de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul eerst afneemt en vervolgens toeneemt, zie ook appendix R.

Instabiele evenwichtssituaties in relatie met evenwichtsdiepte

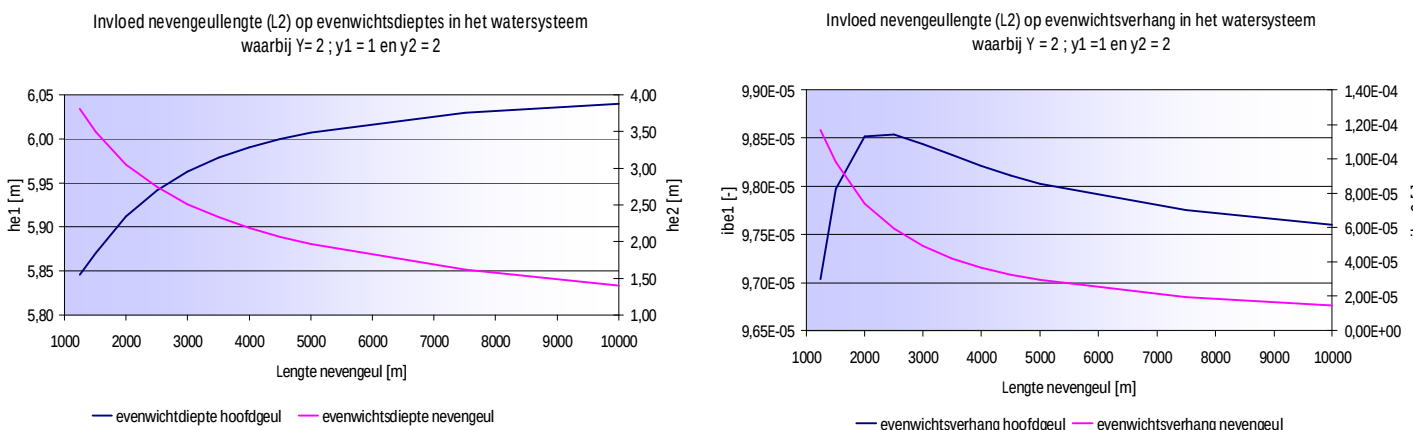
In een instabiele situatie ($Y < n/3$) neemt het debiet en het sedimenttransport naar de nevengeul toe, indien de lengte van de nevengeul groter wordt. Hierbij wordt de evenwichtsdiepte in de nevengeul groter (figuur 19). Dit komt omdat de toename in het debiet naar de nevengeul groter is dan de afname in de sedimenttransport-factor ($Q_{si}^{-1/n}$). Merk wel op dat de evenwichtsdieptes in de nevengeul in deze situaties veel groter zijn dan de evenwichtsdieptes van de hoofdgeul (figuur 11 en figuur 13). Doordat de evenwichtsdiepte in de nevengeul toeneemt, neemt de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul af.

Evenwichtsverhang in relatie met stabiele en instabiele situaties

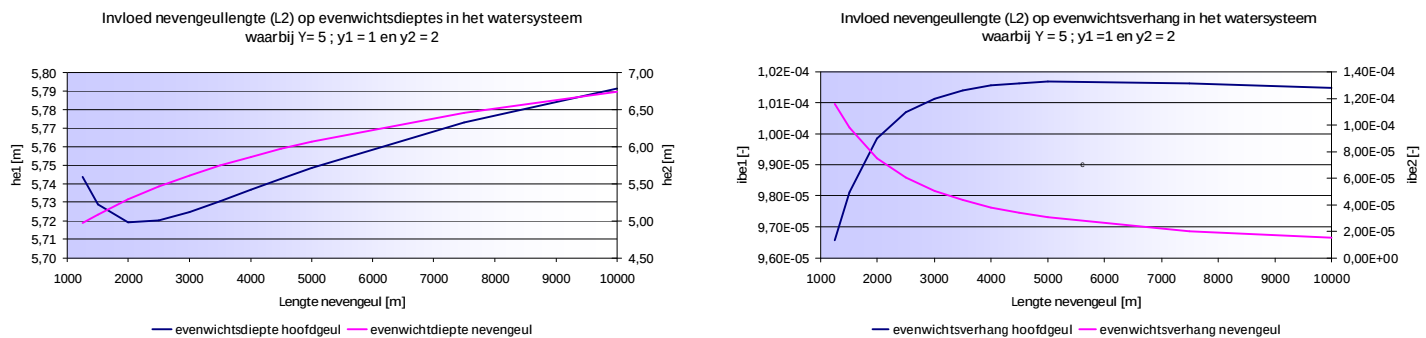
In alle gevallen neemt het evenwichtsverhang van de nevengeul af. Gezien het feit dat de lengte van de nevengeul steeds groter wordt, is dit ook de verwachting. Uit vergelijking (5) kan dit verklaard worden aan de hand van de veranderingen in het debiet en in de evenwichtsdiepte. In situaties waarbij $n/3 < Y < n$ neemt het debiet sneller af dan de evenwichtsdiepte. In situaties waarbij $Y > n$ neemt het debiet af terwijl de evenwichtsdiepte toeneemt. In situaties waarbij $Y < n/3$ is de toename in de evenwichtsdiepte groter dan de toename in het debiet. In alle gevallen neemt hierdoor het evenwichtsverhang in de nevengeul af.



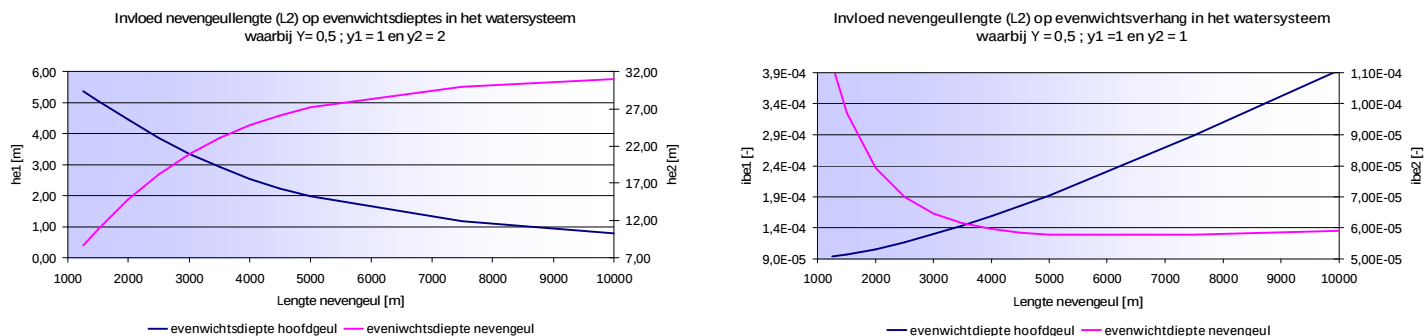
figuur 16: Invloeden van L_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 2$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 1$



figuur 17: Invloeden van L_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 2$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$



figuur 18: Invloeden van L_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 5$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$



figuur 19: Invloeden van L_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 0,5$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$

Effecten geometrie parameters ' C_2 ' en ' B_2 '

In appendix S staan de overige grafieken waarin de invloeden van de stromingsweerstand (C_2) en de breedte van de nevengeul (B_2) op de evenwichtssituaties zijn weergegeven. Voor de invloeden van de stromingsweerstand op de evenwichtsdiepte van de hoofd- en nevengeul gelden dezelfde principes, die gebruikt zijn bij de verklaring van de invloeden van de nevengeullengte (L_2) op de evenwichtssituaties. In stabiele situaties waarbij $n/3 < Y < n$ geeft een grotere stromingsweerstand (kleinere Chezy coëfficiënt) een verlaging van de evenwichtsdiepte in de nevengeul. In stabiele situaties waarbij $Y > n/3$ resulteert een grotere stromingsweerstand (kleinere Chezy coëfficiënt) in een kleinere evenwichtsdiepte van de nevengeul. In instabiele situaties waarbij $Y < n/3$ geeft een grotere stromingsweerstand (kleinere Chezy coëfficiënt) eerst een verhoging van de evenwichtsdiepte van de nevengeul. Deze diepte neemt vervolgens weer af zodra de stromingsweerstand te groot wordt (zie appendix S).

Het breder maken van een kanaal leidt altijd, ongeacht de sedimentverdeling, tot een kleinere evenwichtsdiepte in de nevengeul en tot een grotere evenwichtsdiepte in de hoofdgeul. Het is belangrijk om op te merken dat de vergelijking van de evenwichtsdiepte, zoals weergegeven in vergelijking (4), naast de veranderingen in de debietverhouding en sedimenttransport verhouding, nu ook direct wordt beïnvloed door de breedte van de nevengeul.

Verwachte sedimentatie in nevengeulen in relatie met de geometrie

Nu het meer inzichtelijk is geworden, in hoeverre de geometrie-parameters van nevengeulen bij verschillende sedimentverdelingen op de evenwichtsdiepte van de hoofd- en nevengeul zich verhouden, kan er een vertaling worden gemaakt in welke typen nevengeulen (geometrie) sedimentatie verwacht kan worden. Sedimentatie in een nevengeul kan verwacht worden daar waar de evenwichtsdiepte in de nevengeul klein is. Juist bij relatieve kleine evenwichtsdieptes kan het evenwichtsbodempeil hoger zijn dan het bodempeil waarop een ongelijkwaardige nevengeul wordt aangelegd (figuur 13).

- Instabiele evenwichtssituaties

Instabiele situaties ($Y < n/3$) leiden altijd tot grote evenwichtsdieptes in de nevengeul. Hierdoor komt het gerelateerde evenwichtsbodempeil in eerste instantie zeer laag in het watersysteem te liggen (figuur 13). Uit de stabiliteitsanalyse (paragraaf 5.3) is echter duidelijk geworden dat deze waarden van parameter ' Y ' altijd leiden naar een situatie waarbij één kanaal volledig dicht sedimenteert. Doordat nevengeulen veel hoger worden aangetakt aan een rivier is de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) eigenlijk al te groot voor deze instabiele

evenwichtssituaties. Dit leidt tot volledige sedimentatie van de nevengeul als gevolg van de waterdiepteverstoring 1 (situatie C in figuur 14). Een oplossing kan zijn om de geometrie van de nevengeul zo aan te passen, dat de evenwichtsdiepte van de nevengeul kleiner wordt. In situaties waarbij $Y < n/3$ kan de evenwichtsdiepte van de nevengeul verkleind worden door:

- § kleinere nevengeullengte (L_2);
- § een lagere stromingsweerstand (C_2);
- § een bredere nevengeul (B_2).

Bovengenoemde veranderingen in de geometrie van een nevengeul zijn beperkt omdat de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul zo groot mogelijk moet blijven. Binnen deze beperkte geometrische veranderingen van de nevengeul blijft de evenwichtsdiepte van de nevengeul nog steeds relatief groot. Als gevolg van de nog steeds geldende grote waterdiepteverhouding tijdens het evenwicht zal de nevengeul altijd nog steeds volledig dicht sedimenteren bij deze sedimentverdelingen ($Y < n/3$).

- Stabiele evenwichtssituaties

In stabiele evenwichtssituaties waarbij $Y > n/3$ zijn de evenwichtsdieptes in de nevengeul veel kleiner dan bij instabiele evenwichtssituaties (figuur 13). Bovendien zijn dit evenwichtssituaties waarbij zowel de hoofd- en nevengeul open blijven. Juist in situaties waarbij $n/3 < Y < n$ kan in een nevengeul (ongelijkwaardig aangetakt) veel sedimentatie verwacht worden. Dit komt omdat hoe lager parameter 'Y' is, hoe meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Deze evenwichtsdieptes in de nevengeul worden nog kleiner wanneer de lengte van de nevengeul toeneemt (figuur 16, figuur 17), de stromingsweerstand groter of de breedte van de nevengeul groter wordt (Appendix S). Uit deze analytische waarnemingen kan dus geconcludeerd worden dat lange (smalle) nevengeulen (dus een klein verhang) met een hoge stromingsweerstand de potentie hebben om te sedimenteren. Een lage evenwichtsdiepte wil echter nog niet per definitie zeggen dat de nevengeul op korte termijn volledig dicht zal sedimenteren. Dit zal moeten blijken uit de numerieke analyses in hoofdstuk 7. Merk op dat de evenwichtssituaties ook onder de aanlegdiepte van de nevengeul kunnen liggen. Er kan dus ook erosie ontstaan in de nevengeul.

In situaties ($Y > n$) zijn de evenwichtsdieptes van de nevengeul zowel niet laag als hoog (figuur 13). In deze situaties kan in een ongelijkwaardige aangetakte nevengeul eerder erosie dan sedimentatie verwacht worden. Deze evenwichtsdieptes worden kleiner wanneer de lengte van de nevengeul afneemt (figuur 18), de stromingsweerstand kleiner of de breedte van de nevengeul groter wordt. Uit deze analytische waarnemingen kan dus geconcludeerd worden dat korte, brede nevengeulen met een lage stromingsweerstand (hoge Chezy coëfficiënt) een lagere evenwichtsdiepte hebben. De evenwichtsdieptes zijn echter nog steeds relatief hoog, waardoor nog steeds bij ongelijkwaardig aangetakte nevengeulen (die een hoog instroompeil hebben) erosie verwacht kan worden.

5.7 Conclusies analytische resultaten

Het watersysteem, zoals beschreven in dit onderzoek, bestaat uit een moedergeul, een hoofdgeul en een nevengeul, waarbij de breedte van de nevengeul veel kleiner is dan de breedte van de hoofdgeul ($B_2 < B_1$). Om de morfologische ontwikkelingen van dit watersysteem te analyseren is er een splitsingspuntrelatie gebruikt, waarbij de sedimentverdeling afhankelijk is van de afvoerverdeling in relatie tot een macht van parameter 'Y', zie ook vergelijking (10). Deze parameter 'Y' bepaalt hoofdzakelijk de sedimentverdeling bij splitsingspunten, waarmee de effecten van sedimentverdelingsprocessen vertaald kunnen worden. Hierbij leidt een grotere waarde voor parameter 'Y' tot een groter (resp. kleiner) sedimentaanbod naar de hoofdgeul (resp. nevengeul). De parameters ' γ_1 ', ' γ_2 ' zijn calibratie factoren waaraan geen fysische principes ten grondslag liggen. Deze kunnen gebruikt worden om de splitsingspuntrelatie te beïnvloeden indien de daadwerkelijke sedimentverdeling bekend is. Tot op heden zijn de sedimentverdelingen die optreden bij de nevengeulen nog niet kwantitatief bekend. Dit omdat de sedimentverdelingsprocessen nog niet (volledig) fysisch beschreven zijn en dus niet berekend kunnen worden. Daarom is het niet mogelijk om voor een nevengeul (nauwkeurig) de 'Y' waarde te bepalen voor een juiste sedimentverdeling bij het splitsingspunt.

Parameter 'Y' zal relatief hoger worden in situaties waarbij de nevengeul in het einde van een buitenbocht ligt (spiraalstroming), ongelijkwaardig is aangetakt (kleinere Bulle effect, dwarshelling) en voorzien is van een drempelconstructie (geen vrije instroom van sediment), zie ook de beschrijvingen van deze processen in paragraaf 3.4.3. In omgekeerde situaties zal dit resulteren in een kleinere 'Y' waarde. Merk wel op dat de grootste veranderingen optreden in de evenwichtsdieptes van de nevengeul wanneer Y_{crit} ($Y_{crit} = n/3$) wordt benaderd (figuur 11). Dit komt omdat de sedimentinstroom naar de nevengeul voor Y-waarden die veel groter zijn dan Y_{crit} praktisch nul zijn via de splitsingspuntrelatie (Appendix L).

Het is belangrijk om op te merken dat de parameter 'Y' in de analytische en numerieke analyses constant wordt verondersteld, terwijl de effecten van de sedimentverdelingsprocessen in werkelijkheid variabel zijn (Kleinhans, 2008). In het SOBEK-RE model verandert de sedimentverdeling alleen, nadat een zekere waarde voor parameter 'Y' is gekozen, wanneer de afvoerverdeling verandert die weer afhankelijk is van de geometrie van de nevengeul met betrekking tot een zekere afvoersituatie. Variaties in de sedimentverdeling door de morfologische ontwikkeling in het watersysteem zelf (dwarshellingen) of door verandering van bodemvormen tijdens hogere afvoeren, die tot een andere Y-waarde kunnen leiden, worden dus niet meegenomen. Dit betekent volgens Kleinhans (2008) dat de sterke dynamiek in de morfologische ontwikkeling van de hoofd- en nevengeul niet (goed) meegenomen kan worden met deze splitsingspuntrelatie.

Uit de evenwichtsanalyse en de stabiliteitsanalyse is gebleken dat, in sedimentverdelingen waarbij parameter 'Y' groter of kleiner is dan $n/3$, er een onderscheid kan worden gemaakt in de morfologische ontwikkelingen van nevengeulen. In de evenwichtsanalyse leiden situaties in het watersysteem met een $Y > n/3$ altijd naar relatief hoge evenwichtsdiepte verhoudingen ($h_{e1} > h_{e2}$) en dus naar lage evenwichtsdieptes voor de nevengeul. Daarentegen leiden situaties in het watersysteem met een $Y < n/3$ altijd tot relatief lage evenwichtsdiepte verhoudingen ($h_{e1} < h_{e2}$), en dus naar relatief hoge evenwichtsdieptes voor de nevengeul (figuur 13). In samenhang met waterdiepteverstoringen vormen deze evenwichtsdieptes altijd instabiele evenwichtssituaties, waardoor altijd één kanaal volledig dicht zal sedimenteren. Omdat nevengeulen ongelijkwaardig worden aangetakt op het riviersysteem ($h_1 > h_2$) wordt de nevengeul tijdens instabiele situaties dus aangelegd boven de berekende evenwichtsdiepte ($h_2 < h_{2e}$). Dit kan gezien worden als een waterdiepteverstoring waardoor altijd de nevengeul volledig dicht zal sedimenteren (situatie C in figuur 14).

Uit de numerieke SOBEK-resultaten, die staan weergegeven in hoofdstuk 7, is gebleken dat instabiele situaties ($Y < n/3$), binnen een termijn van 10 jaar, tot volledige sedimentatie van de nevengeul leiden. Tot op heden zijn meestromende nevengeulen in de Rijntakken na een periode van circa 10 jaar nog steeds niet volledig dicht gesedimenteerd (tabel 1). Instabiele situaties hebben zich dus tot zover nog niet voorgedaan in de praktijk. Blijkbaar wordt de sedimentinstroom naar de nevengeul voldoende gereduceerd door de wijze waarop de huidige nevengeulen zijn en worden aangelegd (paragraaf 3.4.3). Bovendien is de verwachting, dat bij nevengeulen, er in verhouding nog steeds veel meer sediment naar de hoofdgeul dan naar de nevengeul wordt getransporteerd. Dit duidt eveneens op stabiele situaties waarbij 'Y' relatief groot is. Toch kan niet volledig uitgesloten worden dat instabiele situaties zich in de huidige nevengeulen niet zullen voordoen. Volgens Kleinhans (2008) kan parameter 'Y' (sterk) variëren waardoor het mogelijk is dat het watersysteem in de tijd

kan variëren tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties. Het is dus essentieel om te achterhalen in hoeverre de huidige nevengeulen zich van een instabiele situatie bevinden. Meer hierover in hoofdstuk 7 met betrekking tot de numerieke analyses. Wanneer blijkt dat deze zich dicht bij een instabiele situatie bevinden kan het noodzakelijk zijn om de sedimentinstroom naar de nevengeul te reduceren met bijvoorbeeld sedimentreducerende maatregelen.

Evenwichtssituaties waarbij $Y > n/3$ vormen stabiele evenwichtssituaties. Dit betekent dat het watersysteem, ongeacht de waterdiepteverstoringen, altijd weer terugkeert naar zijn oorspronkelijke evenwicht. In situaties waarbij $Y > n$ wordt eerder erosie van nevengeulen verwacht, vanwege lage evenwichtsbodempeilen gerelateerd aan de grotere evenwichtsdieptes. Juist in situaties waarbij $n/3 < Y < n$ kan in een nevengeul sedimentatie verwacht worden. Deze evenwichtsdieptes in de nevengeul worden nog kleiner in de analytische studie wanneer:

- lengte van de nevengeul groter wordt (kleiner verhang);
- de stromingsweerstand van de nevengeul groter wordt;
- de breedte van de nevengeul groter wordt.

Echter, erosie van de nevengeul kan in deze situaties echter niet uitgesloten worden, omdat de daadwerkelijke ontwikkeling in de morfologie ook nog afhankelijk is van de aanlegdiepte van de nevengeul.

Doordat in deze situaties de nevengeul niet volledig dicht sedimenteert wilt nog niet zeggen dat er geen conflicten zullen ontstaan met de morfologische ontwikkeling van de nevengeul. De evenwichtsdiepte kan namelijk nog steeds kleiner zijn dan het gewenste bodempeil van de nevengeul in verband met de benodigde maatgevende afvoercapaciteit uit veiligheidsoverwegingen. Hiervoor is het belangrijk om te analyseren binnen welk tijdsbestek deze evenwichtsdieptes worden bereikt en hoe de morfologische ontwikkelingen verlopen. Om deze redenen worden er in de numerieke analyses in hoofdstuk 7, waarbij parameter ' Y ' $> n/3$, hoofdzakelijk stabiele evenwichtssituaties geanalyseerd. Merk op dat deze randvoorwaarde niet direct is te benaderen in de numerieke analyses. Dit komt omdat er in de realiteit geen sprake is van een stationaire afvoer en parameter ' n ', die afhankelijk is van de afvoer, dus variabel is (tabel 3). Hierdoor zal parameter ' Y ' uit de randvoorwaarde ' $Y > n/3$ ' in principe ook steeds veranderen.

6 Morfologische ontwikkeling nevengeulen: Rijntakken model

Aan de hand van de analytische studie is meer inzicht verkregen in hoe de splitsingspuntrelatie de evenwichtssituatie van het watersysteem, bestaande uit een hoofd- en nevengeul, beïnvloedt. Bij deze analyses is telkens afzonderlijk bepaald, in hoeverre de evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang van de hoofd- en nevengeul veranderen, bij verschillende sedimentverdelingen en door de geometrie van de nevengeul. Met deze analytische studie kan echter niet bepaald worden in welk tijdsbestek deze evenwichtssituaties bereikt worden en hoe de morfologische ontwikkelingen van beide benedenstroomse kanalen verlopen. Deze inzichten zijn wel belangrijk om te kunnen vaststellen of sedimentatie in nevengeulen daadwerkelijk conflicteren met het toekomstige beheer en onderhoud van nevengeulen. Op grond van het voorgaande worden er ook verschillende situaties numeriek doorgerekend in het SOBEK-RE model (hoofdstuk 7). Alvorens de numerieke resultaten worden besproken volgt eerst in dit hoofdstuk een beschrijving voor de keuze en de werking van het 1D SOBEK-RE model in paragraaf 6.1. De gedetailleerde beschrijving van de geometrie van de nevengeul wordt besproken in paragraaf 6.2.

6.1 SOBEK-RE model

Het grote verschil tussen 2D en 3D modellen en een 1D model is dat er bij een 1D model een relatie moet worden opgegeven voor de sedimentverdeling voor een splitsingspunt. Ondanks de grote onzekerheid over deze splitsingspuntrelatie, kan hiermee toch op eenvoudige wijze meer inzicht worden verkregen hoe verschillende sedimentverdelingen resulteren in verschillende evenwichtssituaties in het watersysteem. Daarnaast zijn de benodigde data voor een 1D model kleiner, waardoor de geometrie van een kanaal eveneens makkelijker en sneller aangepast kan worden. Bovendien kan een 1D model veel sneller de verschillende scenario's doorrekenen dan een 2D model. Bovenstaande argumenten hebben er toe geleid om de numerieke analyses aan de hand van een 1D model te uit te voeren. Omdat er in dit onderzoek zowel hydraulisch als morfologisch moet worden gerekend, is de keuze gevallen voor het SOBEK-RE model (versie 2.52.006) in combinatie met de Rijntakken schematisatie. Deze schematisatie is speciaal ontworpen om morfologische effecten te kunnen bepalen van verschillende Ruimte voor de Rivier (RvdR) projecten (Tönis & Taal, 2008).

6.1.1 Beschrijving SOBEK-RE model

In het 1D SOBEK-RE model kan de dynamische interactie tussen de waterbeweging, sedimenttransport en de verandering van het bodempeil van de rivier meegenomen worden. Dit in tegenstelling tot de analytische benaderingen die gemaakt zijn in hoofdstuk 5. Hierbij gebruikt het SOBEK-RE model de onderstaande continuïteitsvergelijking (34) en de bewegingsvergelijking (35) voor de waterbeweging. De sedimentbeweging wordt berekend met vergelijking (36) en (37).

Waternvergelijkingen

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (34)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_b \cdot \frac{Q^2}{A_f} \right) + g \cdot A_f \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g \cdot Q \cdot |Q|}{C^2 \cdot R \cdot A_f} - W_f \cdot \frac{t_{wi}}{r_w} + g \cdot A_f \cdot (h + x \cdot Q \cdot |Q|) + \frac{g}{r_w} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot A_m = 0 \quad (35)$$

Hierin:

Q = debiet [m³/s]

T = tijd [s]

X = afstand [m]

α_b = Boussinesq contante [-]

A_f = stroomvoerende oppervlakte [m²]

q_{lat} = laterale afvoer [m²/s]

g = zwaartekracht [m/s²]

h = waterpeil boven referentieniveau [m+NAP]

C = Chezy coëfficiënt [m^{1/2}/s]

R = hydraulische straal [m]

W_f = stroomvoerende breedte [m]
 τ_{wi} = schuifspanning t.g.v. wind [N/m^2]
 ρ_w = dichtheid water [kg/m^3]
 η = eerste additionele weerstandscoefficiënt [-]
 ζ = tweede additionele weerstandscoefficiënt [-]
 A_{tm} = eerste orde moment dwarsdoorsnede [m^3]

Sedimentvergelijkingen

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} - \frac{\partial S}{\partial x} = -s_{lat} \quad (36)$$

$$S = W_s \cdot c_f \cdot s \quad (37)$$

hierin:

A_s = sediment transporterende oppervlakte [m^2]
 S = sedimenttransport inclusief poriën volume [m^3/s]
 s_{lat} = laterale sedimenttoevoer inclusief poriën [m^2/s]
 W_s = sedimenttransporterende breedte
 c_f = calibratiefactor (A) in sedimenttransportformule, zie ook vergelijking (17) [-]
 s = sedimenttransport per eenheid breedte [m^2/s]

Vergelijking (37) is gelijk aan de 'user-defined' sedimenttransport vergelijking (16) die in paragraaf 4.5 staat beschreven.

Werking SOBEK

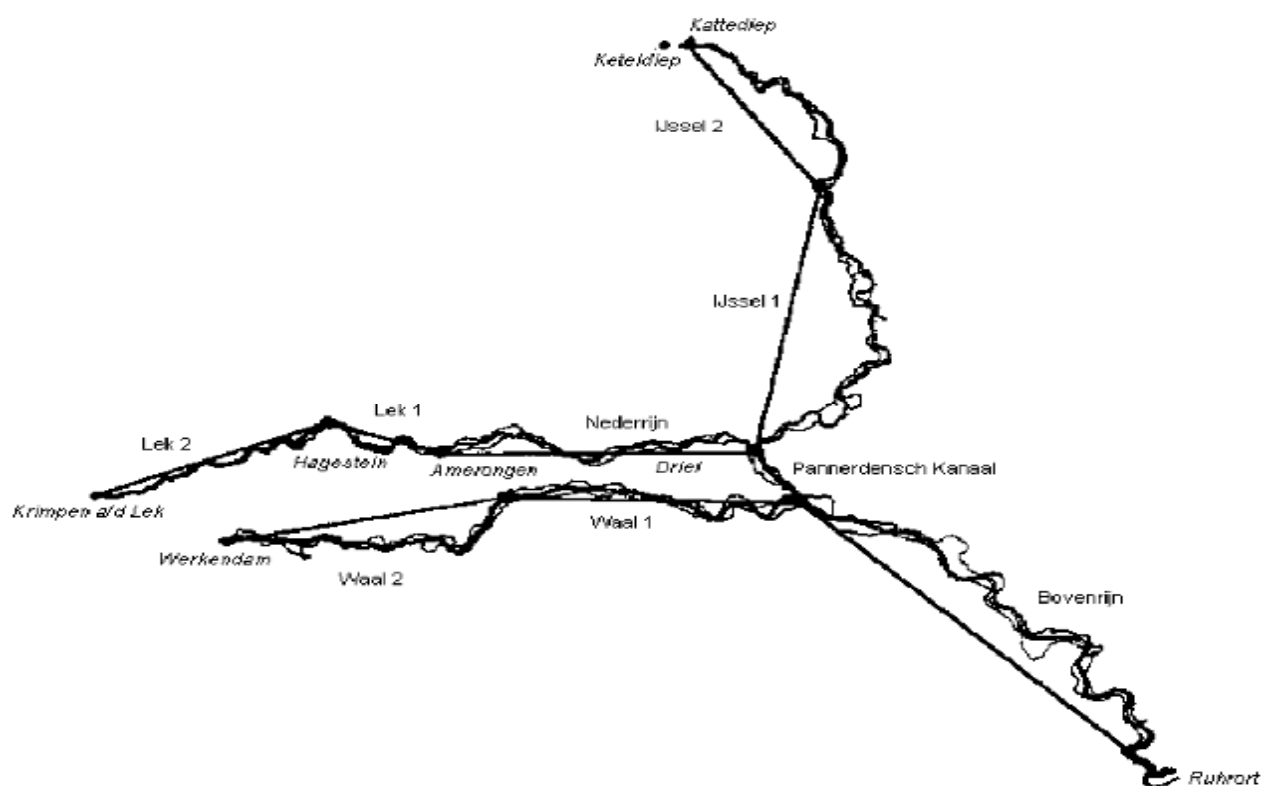
Bovenstaande vergelijkingen leiden samen tot een numerieke oplossing. Hiervoor wordt eerst de waterbeweging bepaald op basis van de geldende dwarsdoorsnede van de voorgaande rekenstap. Tussen de opgegeven dwarsprofielen (gridpunten) wordt geïnterpoleerd. Vervolgens worden de morfologische verandering in een dwarsprofiel bepaald aan de hand van een eventuele gradiënt in het sedimenttransport tussen twee gridpunten. Dit houdt in dat het SOBEK-RE model alleen rekening houdt met de hydraulische situatie en dus niet met eventuele drempelconstructies of dwarshellingen, die het sedimenttransport tegen kan gaan. Verder wordt het sediment in de Rijntakken schematisatie, tijdens de morfologische ontwikkelingen, proportioneel verdeeld naar de heersende waterdiepte in de dwarsprofielen. Dit betekent dat de meeste erosie of sedimentatie optreedt in een dwarsprofiel waar de waterdiepte het grootst is.

6.1.2 Beschrijving en validatie (Rijntakken) schematisatie

In figuur 20 is de schematisering van de Rijntakken, bestaande uit 11 kanalen en 12 knooppunten, in het SOBEK-RE model globaal weergegeven. De trajectlengte van de kanalen zijn in tabel 5 weergegeven. Als randvoorwaarde is er bovenstrooms in Rurhort een $Q(t)$ relatie opgelegd van circa 100 jaar waarin een 15 jarige afvoerreeks telkens herhaald wordt. De vier randvoorwaarden die benedenstrooms zijn opgelegd bestaan allemaal uit $Q(h)$ relaties. Verder zijn er in de schematisatie 3 stuwen geplaatst die het afvoerloop door de Rijntakken reguleren. In het gehele Rijntakken model komen 3 splitsingspunten voor: splitsingspunt tussen Pannerdensch kanaal en de Waal, splitsingspunt tussen de IJssel en de NederRijn en het splitsingspunt tussen Keteldiep en Kattediep. In het oorspronkelijke model is geen $S(t)$ relatie opgegeven, doordat het sedimenttransport in het model zelf berekend wordt aan de hand van de dagelijkse afvoer die is opgelegd door de bovenstroomse $Q(t)$ relatie. De grid-afstand in de hoofdrijen bedraagt 500 meter met uitzondering van de BovenRijn, waarbij de grid-afstand ongeveer 1000 meter is. Verder wordt op elk grindpunt een profiel van de dwarsdoorsnede opgegeven.

tabel 5: Overzicht geschematiseerde Rijntakken uit: Tollenaar (2002).

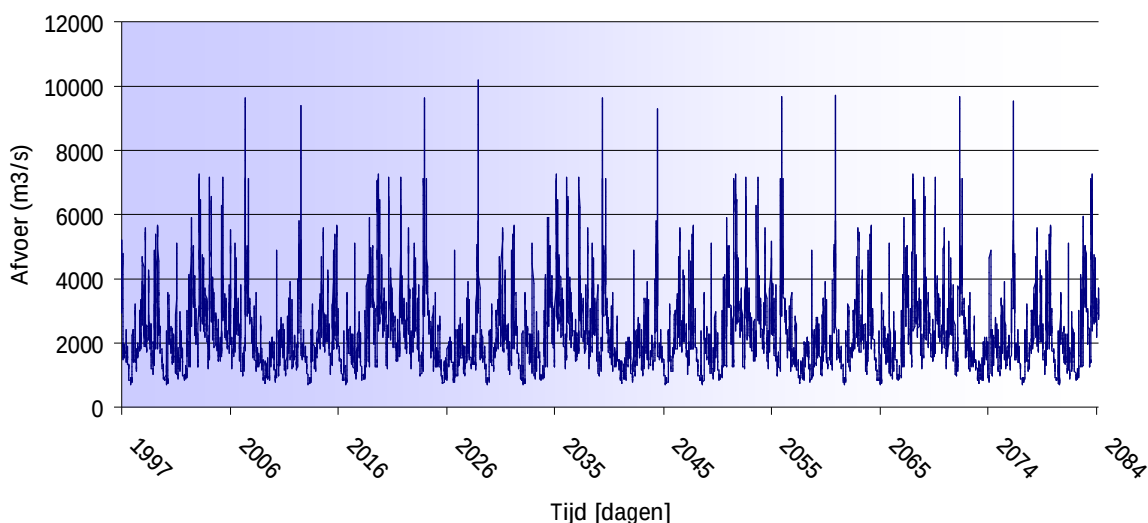
Tak	Bovenstroomse tak (km)	Benedenstroomse tak (km)
Bovenrijn	781,1	867,06
Waal 1	867,06	913,44
Waal 2	913,44	961,00
Pannerdensch Kanaal	867,06	878,59
Nederrijn	878,59	929,00
Lek 1	929,00	947,36
Lek 2	947,36	988,58
IJssel 1	878,59	957,10
IJssel 2	957,10	1001,14
Keteldiep	1001,14	1006,60
Kattediep	1001,14	1002,23



figuur 20: schematisatie van de Rijntakken in het SOBEK-Re model.

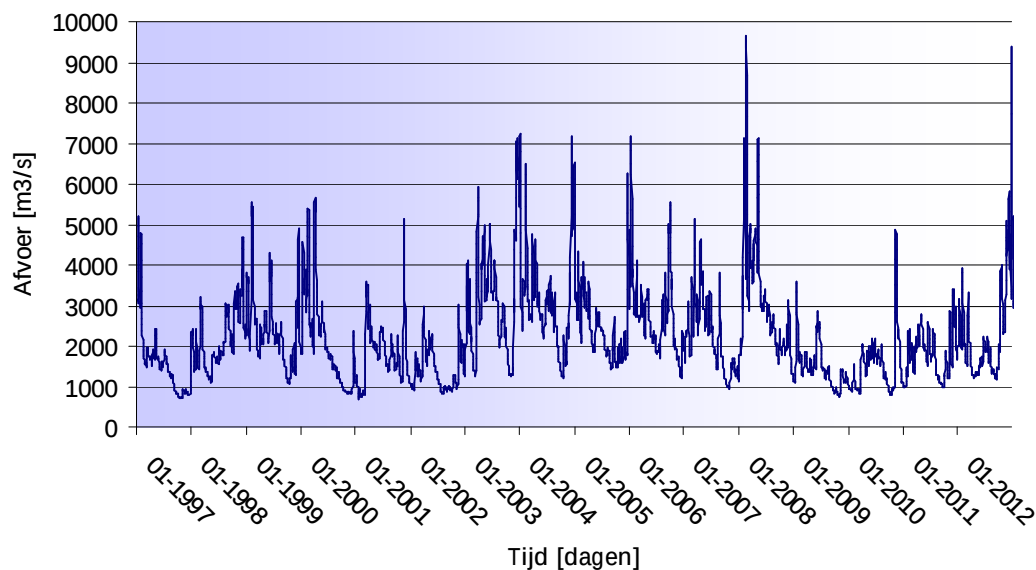
In figuur 21 is de afvoerreeks (84 jaar) bij Lobith weergegeven die afkomstig is uit het Rijntakken model. Deze afvoerreeks is verkregen door de afvoerreeks, zoals weergegeven in figuur 22, (15 jaar) te herhalen.

Afvoerreeks (84 jaar) bij Lobith



figuur 21: In deze figuur is de afvoerreeks (84 jaar) bij Lobith weergegeven.

Hydrograaf van circa 15 jaar bij Lobith

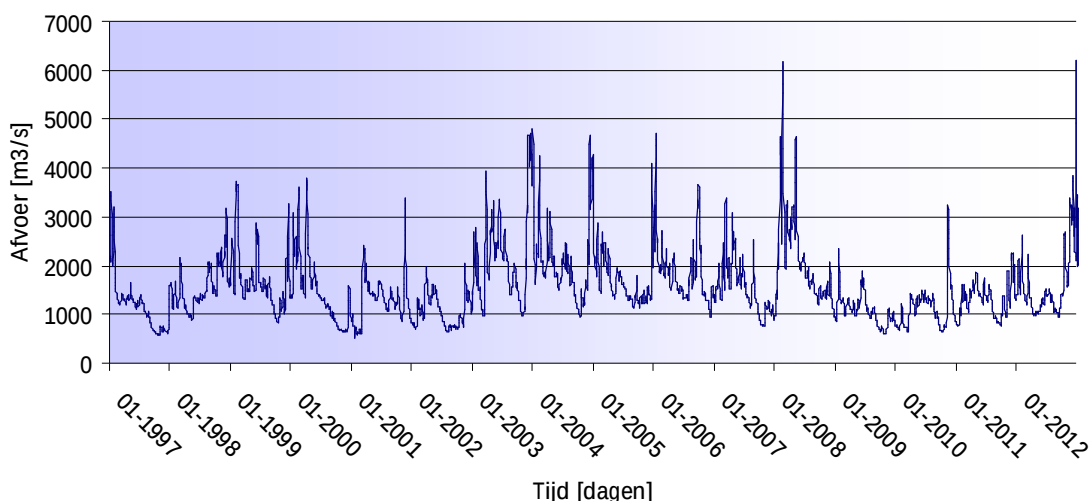


figuur 22: In deze figuur is de herhaalde afvoerreeks (15 jaar) bij Lobith weergegeven.

Omdat later verschillende sedimentverdelingen op het splitsingspunt (parameter 'Y') en verschillende waarden in de geometrieparameters (L_2 , C_2 en B_2) in de SOBEK nevengeul doorgerekend moeten worden, is het onnodig om voor elke situatie het gehele Rijntakken model door te rekenen. Daar de nevengeulen van Gameren, die in het verleden morfologisch gemonitord zijn door Jans (2004) in de Waal zijn aangelegd, is er besloten om de numerieke analyses ook voor deze locatie uit te voeren. Hierdoor kunnen de morfologische ontwikkelingen die verkregen worden in de eigen ontworpen SOBEK nevengeul (hoofdstuk 7) vergeleken worden aan een praktijksituatie waarbij sedimentatie in de nevengeul heeft plaatsgevonden. Merk op dat tot op heden alleen in de nevengeulen van Gameren sedimentatie heeft plaatsgevonden en die ook in het verleden morfologisch gemonitord zijn (paragraaf 3.5.1).

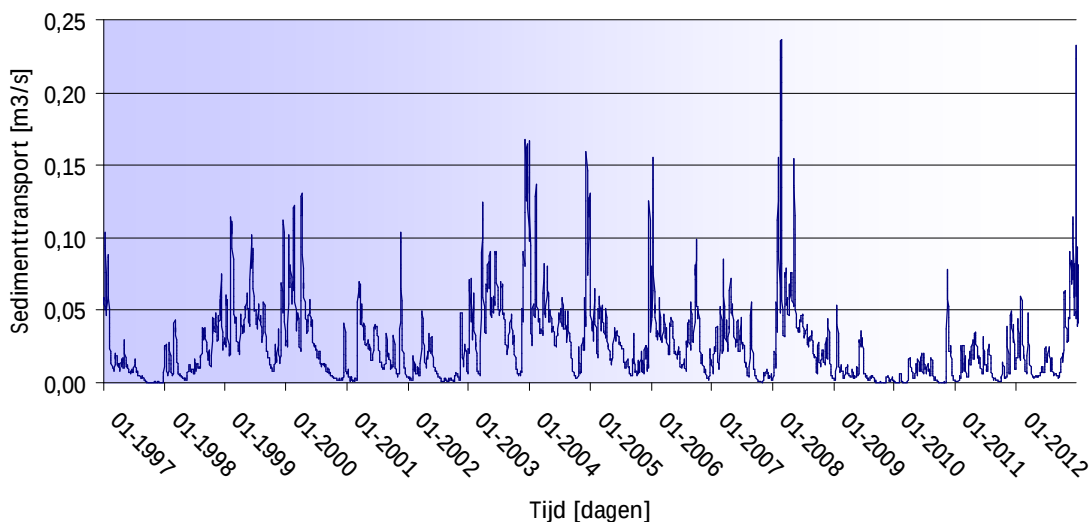
Doordat nu voor de numerieke analyses alleen de takken van de Waal nodig zijn, kunnen de overige takken verwijderd worden (figuur 25). Dit is gedaan door een nieuwe $Q(t)$ relatie en een $S(t)$ relatie te definiëren voor de Waal op het kilometerpunt 867 (figuur 23 en figuur 24). Deze bovenranden zijn bepaald door de referentiesituatie over de gehele hydrograaf door te rekenen, waarbij de afvoer en het sedimenttransport, op het kilometerpunt 867 in de Waal, per dag zijn uitgelezen. Doordat het SOBEK-RE model een limiet heeft in het weergeven van een grote hoeveelheid data, is de oorspronkelijke hydrograaf van ongeveer 100 jaar gereduceerd tot ongeveer 84 jaar.

Afvoerreeks Waal (rivierkilometer 867,06)



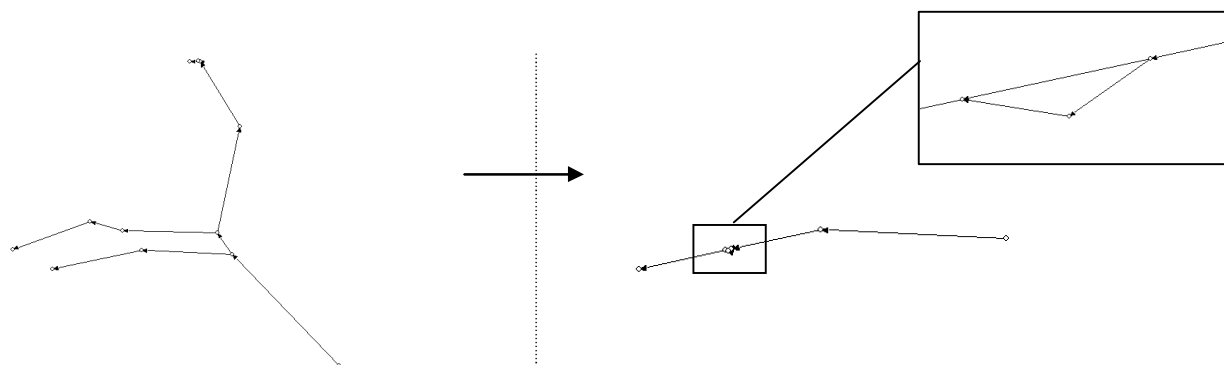
figuur 23: In deze figuur is de nieuwe $Q(t)$ bovenrand in de Waal weergegeven van de nieuwe schematisatie van het Rijntakken model. Voor een beter overzicht van de afvoeren is in deze figuur de herhaalde afvoerreeks van 15 jaar weergegeven in plaats van de totale hydrograaf van 84 jaar.

Sedimenttransport naar de Waal (rivierkilometer 867,06)



figuur 24: In deze figuur is de nieuwe $S(t)$ bovenrand weergegeven van de nieuwe schematisatie van het Rijntakken model. Voor een beter overzicht in het sedimenttransport is in deze figuur de herhaalde afvoerreeks van 15 jaar weergegeven in plaats van de totale hydrograaf van 84 jaar.

Doordat de nevengeulen van Gameren en de eigen ontworpen nevengeulen op het kilometerpunt 937 worden (zijn) aangelegd, bestaat er nog voldoende afstand (70 km) tussen deze bovenranden met de locaties van deze nevengeulen. Hierdoor zal de invloed van de bovenrand geen effect hebben op de hydrologische en morfologische situatie rondom de locatie van de nevengeulen. Na validatie tussen het nieuwe en het oorspronkelijke Rijntakken model is gebleken dat er geen tot weinig verschillen zijn in de hydraulische en morfologische variabelen (zie figuren in appendix O). Bij extreme hoge afvoeren treedt er een hogere spreiding op. Omdat deze extreme afvoeren echter zelden voorkomen, zijn deze fouten acceptabel. Een nevengeul is in de nieuwe situatie telkens geschematiseerd als een apart kanaal, zodat de morfologische ontwikkeling in een nevengeul geanalyseerd kan worden (figuur 25). Merk op dat hierbij twee splitsingspuntrelaties, zowel voor de instroom- als de uitstroomopening van de nevengeul, moeten worden opgegeven. Hierbij is telkens de splitsingspuntrelatie (10) gebruikt. De grid-grootte in de nevengeulen is gelijk 50 meter. De verdere geometrie van de nevengeul wordt beschreven in paragraaf 6.2.



figuur 25: In deze figuur is de schematisatie van de nieuwe situatie ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Ook is hierbij weergegeven hoe de verschillende nevengeulontwerpen in het SOBEK-RE model zijn geschematiseerd.

De verschillende simulaties zijn in de nieuwe schematisatie doorgerekend met een rekentijdstep van één tot zes uur. Uit een analyse is gebleken dat er geen tot weinig verschillen zijn met dezelfde simulatie waarbij de rekentijd step gelijk is aan 1 uur. Verder wordt de Preismann – slot procedure gebruikt bij de numerieke simulaties van de SOBEK nevengeul. Hierbij ontstaat in de waterloop een smalle diepe peilbuis, waardoor in principe altijd waterstroming door de nevengeul kan plaatsvinden. Hierdoor valt de nevengeul niet droog wanneer het waterpeil lager wordt dan het instroompeil. Dit omdat een waterloop in SOBEK altijd watervoerend moet zijn voor de voortgang van de numerieke berekening. Bij de simulaties van de maatregelen worden ook 'restart files' gebruikt. Met deze 'restart files' kan de morfologische ontwikkeling van het watersysteem (hoofdgeul en nevengeul) uit een eerder uitgevoerde simulatie meegenomen worden naar een volgende simulatie, waarvan de berekening zal starten.

6.2 Geometrie en ligging van de SOBEK nevengeul versus hydraulica

In deze paragraaf wordt de geometrie en de ligging van de SOBEK nevengeul beschreven, die later in hoofdstuk 7 wordt gebruikt in de numerieke analyse van de morfologische ontwikkelingen die zich kunnen voordoen in het watersysteem (hoofd- en nevengeul). Om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen zijn de drie nevengeulen van Gameren als referentie gebruikt om realistische waarden toe te kennen aan de geometrieparameters van de eigen ontworpen SOBEK nevengeul. De redenen voor deze keuze zijn geweest dat i) hier sedimentatie plaats vindt, ii) ze gemonitord zijn en iii) de ontwerpparameters bekend zijn.

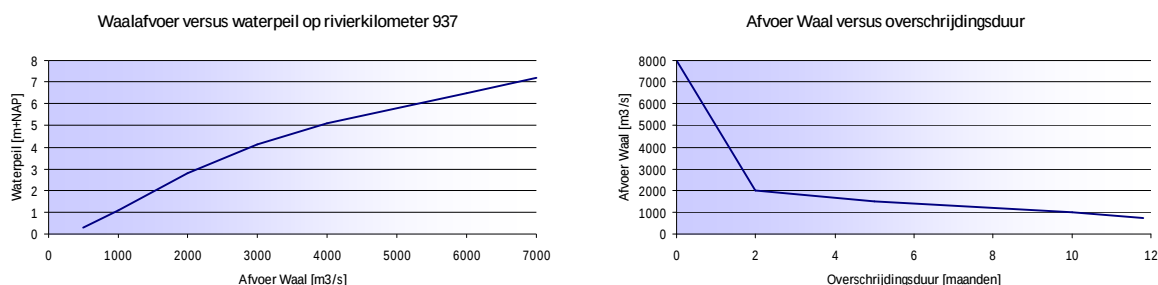
Bij het basisontwerp van het SOBEK-RE model zijn de navolgende richtlijnen gehanteerd (figuur 28 en figuur 29)

- de SOBEK nevengeul onttrekt 3 procent van de totale afvoer tijdens geulvullende afvoercondities van de Waal bij $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- de gemiddelde stroomsnelheid in de SOBEK nevengeul ligt rond de $0,3 \text{ m/s}$ tijdens geulvullende afvoercondities van de Waal bij $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Voordat de waarden van de geometrieparameters van het basismodel worden toegekend volgt eerst een korte beschrijving van de geometrieparameters van de nevengeulen van Gameren.

Geometrie en ligging van de nevengeulen Gameren (Ontwerp nevengeul Gameren, 1996)

De nevengeulen van Gameren (Grote-Geul en Oost-Geul) zijn gelegen op rivierkilometer 937 in de Waal. De West-Geul ligt iets meer stroomsafwaarts tussen rivierkilometer 937,5 en 938. De aanlegdieptes van de nevengeul van Gameren zijn bepaald aan de hand van een Q-h relatie gerelateerd aan een stroomvoerdendheidsfrequentie. Onderstaand in figuur 26 wordt de Q-h relatie, bovenstrooms van de nevengeulen van Gameren (Oost en West Geul), en de bijhorende overschrijdingsduur weergegeven van de Waal (Ontwerp nevengeul Gameren, 1996). Bij de nevengeulen van Gameren varieert de aanlegdiepte van de geulbodem (bovenstrooms) van 0 tot 0,5 m +NAP. Daarnaast zijn de twee periodieke nevengeulen van Gameren nog voorzien van drempelconstructies, waardoor het instroompeil nog iets hoger komt te liggen. Het bodempeil van de Waal ligt ongeveer op -4,9 m + NAP, waardoor er een verschil ontstaat van 5 á 6 meter tussen de rivierbodem van de Waal en het instroompeil van de nevengeulen. De breedte van de geulbodem varieert in de nevengeulen van Gameren van circa 15 tot 30 meter. De taludhelling varieert van 1:5 tot 1:30. Een geulvullende afvoer van 2000 m³/s in de Waal resulteert in een waterpeil van om nabij de 2,8 m+NAP, waarbij de stromingsbreedte van de nevengeulen varieert van 50 tot 100 meter.



figuur 26: (links) is de Q-h relatie van de Waal weergegeven bij de instroomopening van de Grote-Geul en Oost-Geul van Gameren. (rechts) wordt de overschrijdingsduur van verschillende afvoeren naar de Waal weergegeven.

Geometrie en ligging van de SOBEK nevengeul

Om de kenmerken van de SOBEK nevengeul overzichtelijk te houden wordt er onderstaand een onderscheid gemaakt in een aantal kenmerktypen. De waarden die onderstaand beschreven worden, leiden tot de volgende schematisatie van de nevengeul zoals weergegeven in figuur 27.

- Geometrie en aanlegdiepte van de SOBEK nevengeul

De SOBEK nevengeul wordt aangelegd op 0,4 m +NAP, waardoor de nevengeul in de initiële situatie permanent watervoerend is (figuur 26). Ook na enige morfologische ontwikkeling, als gevolg van sedimentatie, blijft de nevengeul voor een groot deel van het jaar watervoerend. In het ontwerp is er gekozen voor een flauwe taludhelling van 1:10, omdat deze vanuit de ecologie gewenst zijn, zie ook de ontwerpprincipes van nevengeulen in appendix G. Vanwege deze flauwe taludhelling is er gekozen voor geulbodem breedte van 10 meter en dit is iets smaller in vergelijking tot de nevengeulen van Gameren. Bij een geulvullende afvoer van 2000 m³/s door de Waal is de stromingsbreedte in de nevengeul 60 meter. Hiermee is deze stromingsbreedte een realistische waarde in vergelijking met de periodieke nevengeulen van Gameren. De uiterwaarden, waarin de nevengeul is uitgegraven, is niet meegenomen in de dwarsprofielbeschrijvingen van de nevengeul. Dit omdat de uiterwaarden al opgenomen zijn in de dwarsprofielen van de Waal vanuit het oorspronkelijke Rijntakken model.

In de praktijk worden vaak drempelconstructies bovenstrooms in de nevengeul aangelegd om de afvoer naar de nevengeul te beperken tijdens afvoercondities die lager zijn geulvullende afvoercondities van het zomerbed. In deze SOBEK nevengeul is geen drempel bovenstrooms van de nevengeul aangelegd. Dit om in eerste instantie meer inzicht te krijgen hoe nevengeulen zich morfologisch kunnen ontwikkelen zonder drempelconstructies of andere regulerende constructies. Daarnaast worden de invloeden van drempelconstructies in het SOBEK-RE model alleen meegenomen in de module van de hydraulica. Het beperken van de sedimentinstroom naar een nevengeul kan in het 1D model niet direct worden meegenomen. Ook is het nog niet bekend in hoeverre drempelconstructies de sedimentinstroom naar de nevengeul daadwerkelijk reduceren. Wel is geprobeerd om deze effecten enigszins mee te nemen bij de maatregelen van sedimentreducerende maatregelen in paragraaf 9.1.

- Verhang en ligging van de SOBEK nevengeul

Omdat de nevengeulen van Gameren relatief korte nevengeulen zijn, is in het ontwerp een nevengeullengte van 2.500 meter gekozen. Beide splitsingspunten van de nevengeul liggen op rivierkilometer 937 en 938,5 van de Waal, waarmee de lengte van de hoofdgeul 1.500 meter bedraagt. Vanwege een gemiddeld verhang van 1:10.000 van de Waal, heeft de nevengeul een verhang van 6:100.000. Dit betekent, dat het peil van de instroomopening gelegen is op een peil van 0,4 m+NAP en het peil van de uitstroomopening van de nevengeul op 0,25 m+NAP.

- Stromingsweerstand van de SOBEK nevengeul

De stromingsweerstand van de nevengeul is in werkelijkheid afhankelijk van de waterdiepte. Deze waterdiepte-afhankelijkheid kan in het SOBEK-RE model berekend worden door een ruwheidshoogte (k_s -waarde) op te geven. Vervolgens kan het model, aan de hand van de White-Colebrook formule, verschillende Chezy coëfficiënten berekenen, waarbij de stromingsweerstand afhankelijk is van de waterdiepte. De White-Colebrook formule is weergegeven in vergelijking (38).

$$C = 18 \cdot \text{LOG} \left(\frac{12 \cdot R}{k_s} \right) \quad (38)$$

hierin:

R = hydraulische straal [m]

k_s = ruwheidshoogte [m]

Om de ruwheidshoogte te bepalen moet de Manning-coëfficiënt gegeven zijn. Door Chow (1959), geciteerd in “Ontwerp nevengeul Gameren (1996)”, zijn Manning-coëfficiënten bepaald voor verschillende type gegraven waterlopen. In dit onderzoek wordt een bochtige, traag stromende en licht begroeide waterloop gelijk gesteld aan een nevengeul, waarbij de Manning-coëfficiënt is vastgesteld op 0,03. Met deze waarde is de ruwheidshoogte gelijk aan 0,18 volgens uit de berekening met vergelijking (39).

$$\frac{n^6}{0,04^6} = k_s \quad (39)$$

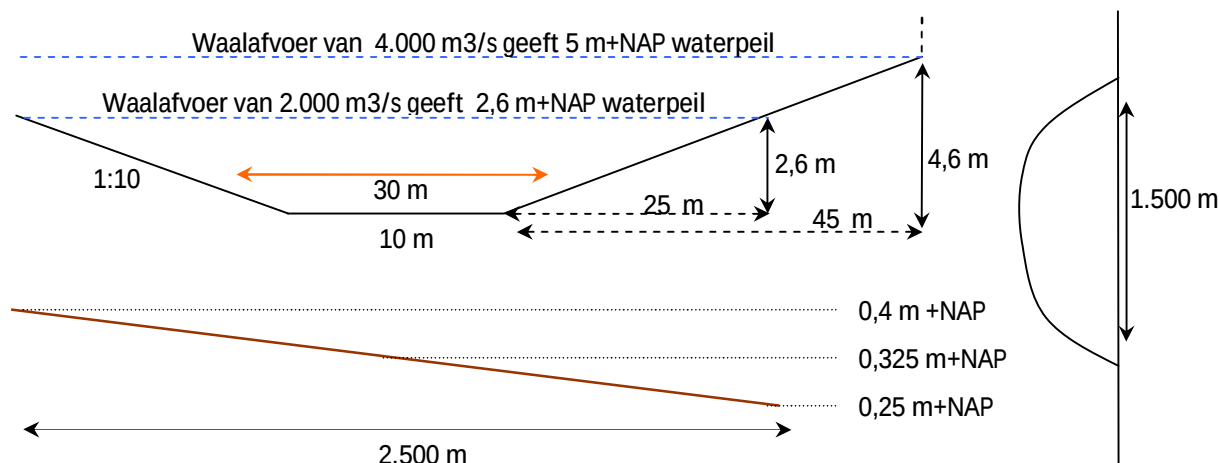
hierin:

n = Manning-coëfficiënt [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]

k_s = ruwheidshoogte [m]

- Sedimenttransport relatie in de SOBEK nevengeul

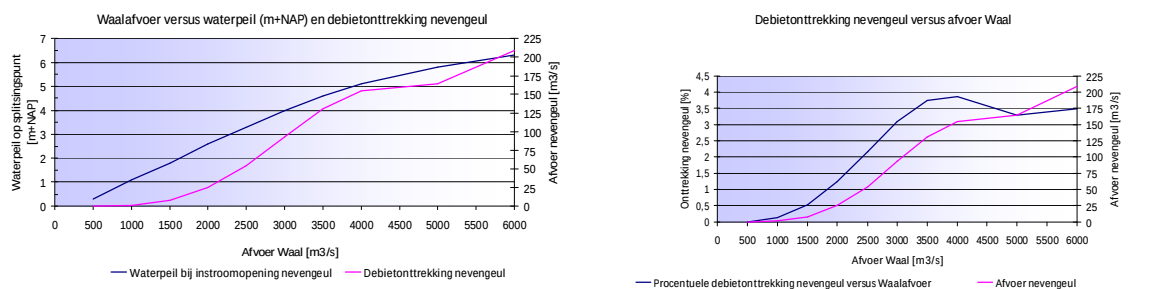
Naast de stromingsbreedte moet in het SOBEK-RE model ook een sedimenttransport-breedte worden opgegeven en is in dit geval gesteld op 30 meter. Hiervoor is gekozen omdat in werkelijkheid het bodemtransport hoofdzakelijk plaatsvindt in de diepere en snelst stromende delen van een nevengeul. Door vegetatie en ondieptes vindt er bij de oever taluds vrijwel geen sedimenttransport plaats. Verder wordt het sedimenttransport in de Waal en in de nevengeul berekend met de ‘User-Defined’ sedimenttransport formule. De waarden van de parameters die in deze transportformule gebruikt worden zijn weergegeven in tabel 2. In de oorspronkelijke schematisatie van de Rijntakken is de sedimenttransport correctiefactor ‘A’ voor de Waal gelijk aan 0,8. Voor de splitsingspuntrelatie betekent dit dat $\gamma_1 = 0,8$. Het sedimenttransport naar de nevengeul kan niet gekalibreerd worden, omdat het ontwerp van deze nevengeul in werkelijkheid niet bestaat. Om deze reden is er voor gekozen om de correctiefactor ‘A’ voor de nevengeul gelijk te stellen aan 1. Dit betekent voor de splitsingspuntrelatie dat γ_2 gelijk is aan 1, zie ook paragraaf 4.6. Ook moet een korrelgrootte voor de D_{50} worden weergegeven dat gelijkgesteld wordt aan 0,001 meter en wordt hiermee gelijkgesteld aan de D_{50} die ook aan de Waal is toegekend.



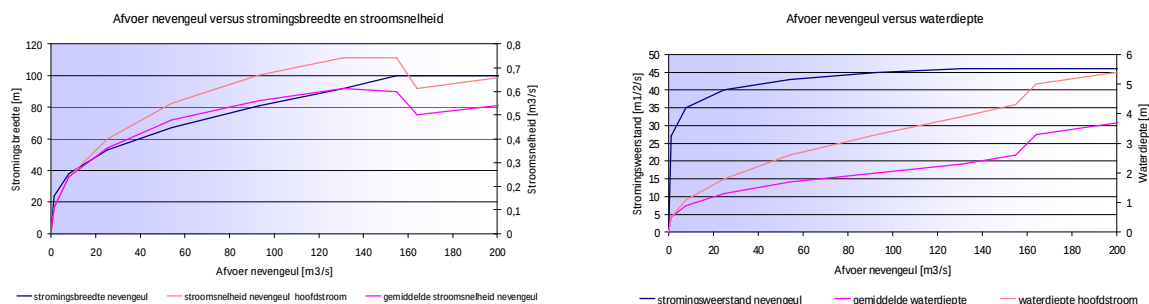
figuur 27: Schematisatie van de SOBEK nevengeul

Hydraulica SOBEK nevengeul

In figuur 28 en in figuur 29 (zie appendix N) staan hydraulische gegevens van de SOBEK nevengeul in relatie met verschillende Waalafvoeren weergegeven. De geometrie en de ligging van de SOBEK nevengeul staat beschreven in hoofdstuk 6. Bij een Waalafvoer van 500 m³/s heerst er een waterpeil van 0,3 m+NAP op het splitsingspunt rivierkilometer 937, waarbij de nevengeul droog staat als gevolg van een instroompeil van 0,4 m+NAP. De nevengeul onttrekt bij een Waalafvoer van 2.000 m³/s een debiet van 25 m³/s. Dit is een procentuele onttrekking van 1,25 procent van de totale afvoer van de Waal. Vanaf een afvoer van 4.000 m³/s door de Waal beginnen de uiterwaarden mee te stromen waardoor de toename in debietonttrekking van de nevengeul iets afneemt. Bij een Waalafvoer van 6.000 m³/s onttrekt de nevengeul een debiet van 210 m³/s. De stromingsbreedte van de nevengeul kan oplopen tot 100 meter dat bereikt wordt bij een debiet van circa 160 m³/s naar de nevengeul. De maximale stroomsnelheden die in de nevengeul zullen voorkomen liggen rondom de 0,6 m/s. Bij een Waalafvoer van 2.000 m³/s (onttrekking van 25 m³/s door de nevengeul) ligt de stroomsnelheid in de nevengeul globaal tussen 0,3 – 0,4 m/s. Hierbij heerst een gemiddelde waterdiepte van 1,3 meter. De maximale waterdiepte in de hoofdstroom van de nevengeul bedraagt 5,5 meter bij een Waalafvoer van 6.000 m³/s.



figuur 28: Hydraulische afvoergegevens van de SOBEK nevengeul in relatie met de Waalafvoer



figuur 29: Hydraulische karakteristieken van de SOBEK nevengeul in relatie met de Waalafvoer

7 Morfologische ontwikkelingen en tijdschalen van het watersysteem

Om meer inzicht te krijgen in de tijdschalen van de morfologische ontwikkelingen, die zich kunnen voordoen in een nevengeul, is de nevengeul in het SOBEK-RE model (paragraaf 6.2) doorgerekend met verschillende Y -waarden die liggen tussen $Y = 0,2$ en $Y = 10$. Dit omdat in de praktijk nog niet bekend is welke sedimentverdelingen zich daadwerkelijk voordoen bij nevengeulen. Met deze variatie in parameter ' Y ' (scheve sedimentverdelingen) worden zowel stabiele ($Y > n/3$) als instabiele situaties ($Y < n/3$) meegenomen. Naast de variatie in parameter ' Y ' wordt er ook een onderscheid gemaakt in simulaties van circa 80 jaar die met een stationaire geulvullende afvoer van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ van het zomerbed ($n = 3,33$) en die met een hydrograaf zijn doorgerekend (figuur 23). Dit om te analyseren of er grote verschillen ontstaan in de tijdschalen waarop nevengeulen een evenwicht bereiken. Om meer inzicht te krijgen in sedimentverdelingen (Y -waarde) die zich in de praktijk kunnen voordoen worden de ontwikkelingen in Gameren (Grote-Geul) globaal vertaald naar een parameter ' Y ' (paragraaf 7.2.1). Daarna volgt een analyse over instabiele situaties (paragraaf 7.2.2). Tenslotte wordt bepaald bij welke sedimentverdelingen vroegtijdig moet worden ingegrepen vanuit veiligheidsoverwegingen en dus een conflict kunnen vormen met cyclisch beheer.

7.1 Morfologische ontwikkelingen in watersysteem bij een stationaire afvoer

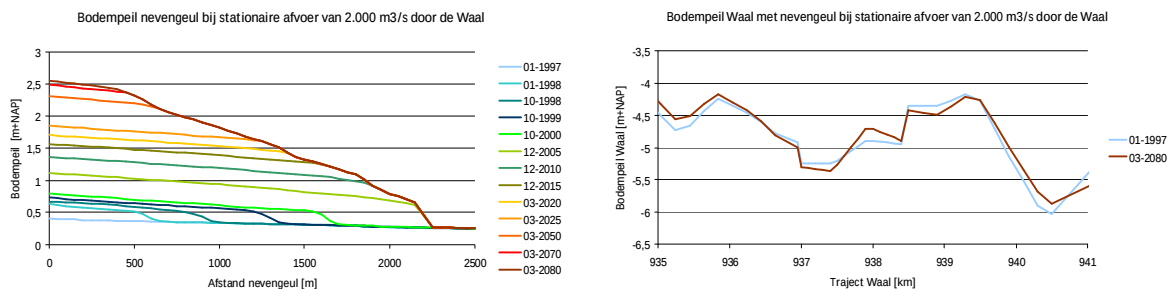
In de onderstaande situaties A tot en met C worden de morfologische ontwikkelingen van zowel de nevengeul (links) als de hoofdgeul (rechts) weergegeven gerelateerd aan drie typen verschillende sedimentverdelingen. De situaties A en B zijn stabiel, waarbij in situatie A parameter ' Y ' gelijk is aan $1,4$ ($n/3 < Y < n$) en in situatie B parameter ' Y ' gelijk is aan 10 ($Y > n$). Situatie C toont een instabiele omgeving ($Y < n/3$), waarbij parameter ' Y ' gelijk is aan $0,5$. Voor de andere sedimentverdelingen, die gemodelleerd zijn in het SOBEK-RE model met de nevengeul, zijn alleen de tijdschalen en het bereikte bodempeil als resultaat meegenomen (figuur 33 en tabel 6). Dit omdat het verloop van de morfologische ontwikkelingen niet veel verschillen ten opzichte van de situaties A tot en met C. In alle bovenstaande situaties is de nevengeul 2.500 meter lang en ligt de nevengeul in de Waal (langs de hoofdgeul) tussen rivierkilometer 937 en $938,5$ (paragraaf 6.2, figuur 25).

Situatie A ($n/3 < Y < n$): morfologische ontwikkeling in het watersysteem

In de morfologische ontwikkeling van situatie A ($Y = 1,4$) in figuur 30 is duidelijk te zien dat er sedimentatie plaatsvindt doordat de evenwichtsdiepte kleiner is dan de huidige waterdiepte. In dit geval is het sedimentaanbod naar de nevengeul groter dan de transportcapaciteit (zie stabiele situatie B in figuur 14). Deze sedimentatie ontwikkelt zich tot een sedimentatiefront dat zich naar verloop van tijd stroomafwaarts verplaatst en tegelijkertijd in hoogte toeneemt. Omdat het sedimentatiefront steeds hoger wordt, stroomt de nevengeul steeds minder vaak mee en verloopt de verdere ontwikkeling van het sedimentatiefront in de nevengeul steeds langzamer. Tevens, omdat het sedimentatiefront en dus het instroompeil van de nevengeul steeds hoger wordt, wordt er steeds minder debiet naar de nevengeul (Q_2) getransporteerd. Hierdoor wordt de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) op het splitsingspunt steeds groter. Een hogere afvoerverdeling leidt in de splitsingspuntrelatie tot een grotere sedimentverdeling op het splitsingspunt (Q_{s1}/Q_{s2}), waardoor steeds minder sediment naar de nevengeul (Q_{s2}) wordt getransporteerd. Het gevolg hiervan is dat het sediment dat nog wel naar de nevengeul wordt getransporteerd, in relatie met afnemend debiet en stroomsnelheden, gelijk bovenstrooms in de nevengeul wordt afgezet. Dit verklaart waarom het bodempeil benedenstrooms van de nevengeul minder snel toeneemt dan het bodempeil bovenstrooms van de nevengeul.

Dit effect wordt in stationaire afvoersituaties nog versterkt, omdat het waterpeil bovenstrooms van de nevengeul constant blijft. Als gevolg van bovenstaande processen wordt er in situatie A, na een periode van circa 80 jaar, een bovenstrooms bodempeil bereikt van $2,57 \text{ m} + \text{NAP}$. Omdat het bodemverhang niet gelijk is aan het waterverhang heeft de nevengeul zijn evenwichtsdiepte nog niet bereikt. Deze bovenstaande principes in het verloop van de morfologische ontwikkeling gelden in het algemeen voor alle sedimenterende nevengeulen.

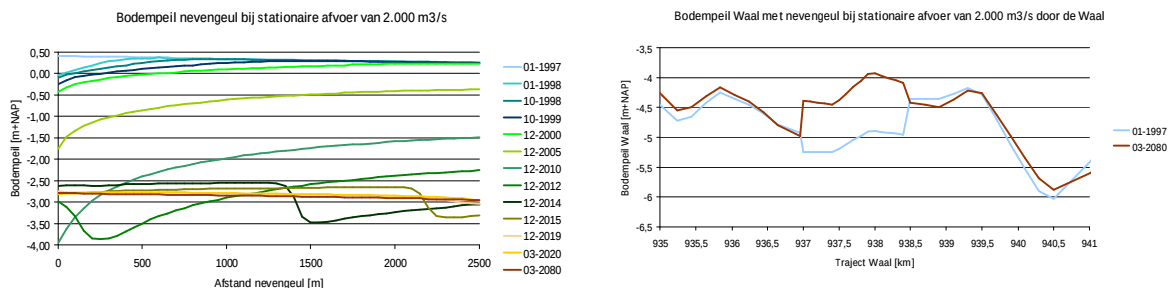
Doordat er teveel sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd wordt er in verhouding te veel debiet naar de hoofdgeul getransporteerd. Dit betekent dat hoofdgeul gaat eroderen. Toch treedt er in deze situatie niet alleen maar erosie op, maar ook sedimentatie benedenstrooms in de hoofdgeul (kilometer $937,5 - 938,5$). De maximale sedimentatie, die optreedt in de hoofdgeul, is ongeveer $0,2$ meter. Deze aanzanding blijft beperkt, omdat er in de initiële situatie door de nevengeul maar $25 \text{ m}^3/\text{s}$ aan de hoofdgeul wordt onttrokken en deze onttrekking steeds kleiner wordt als gevolg van de sedimentatie in de nevengeul.



figuur 30: Situatie A: $Y = 1,4$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$ (links) ontwikkeling in de nevengeul (rechts) ontwikkeling in de hoofdgeul.

Situatie B $Y > n$: morfologische ontwikkeling in het watersysteem

In situatie B ($Y = 10$) in figuur 31 wordt er veel minder sediment naar de nevengeul getransporteerd, omdat hier parameter 'Y' gelijk is aan 10. Uit de analytische evenwichtsparametrisatie is gebleken, dat bij deze sedimentverdelingen ($Y > n$) relatieve grote evenwichtsdieptes voor de nevengeul worden berekend (figuur 11). In dit geval is de evenwichtsdiepte groter dan de huidige waterdiepte, waardoor de nevengeul gaat eroderen. Dit komt omdat het sedimentaanbod kleiner is dan de sedimenttransportcapaciteit. Dit proces verloopt net zolang totdat de evenwichtsdiepte is bereikt (zie stabiele situatie A in figuur 14). In principe zullen eroderende nevengeul eerder hun evenwichtsdiepte bereiken in tegenstelling tot sedimenterende nevengeulen, doordat de nevengeul zichzelf hier niet afknijpt van de rivier. In situatie B is goed te zien hoe, in het verloop van de morfologische ontwikkeling, de nevengeul tijdelijk zijn evenwichtsdiepte voorbij schiet. Als gevolg van de stabiele evenwichtsituatie herstelt de nevengeul zich weer naar het oorspronkelijke evenwicht. In het jaar 2020 heeft de nevengeul zijn oorspronkelijke evenwicht bereikt dat zich bevindt op $-2,8$ m+NAP. Omdat er in situatie B teveel debiet naar de nevengeul wordt getransporteerd, betekent dit dat er te veel sediment naar de hoofdgeul wordt getransporteerd, waarbij de maximale sedimentatie kan oplopen tot 1 meter. De verklaring hiervoor is dat de nevengeul, rond het jaar 2020, een debiet onttrekt van 166 m³/s aan de moedergeul tijdens een geulvullende afvoersituatie van 2000 m³/s. Deze afvoerdivisie ligt op 8 procent en is dus beduidend meer dan de huidige ontwerpdivisie van 3 procent.

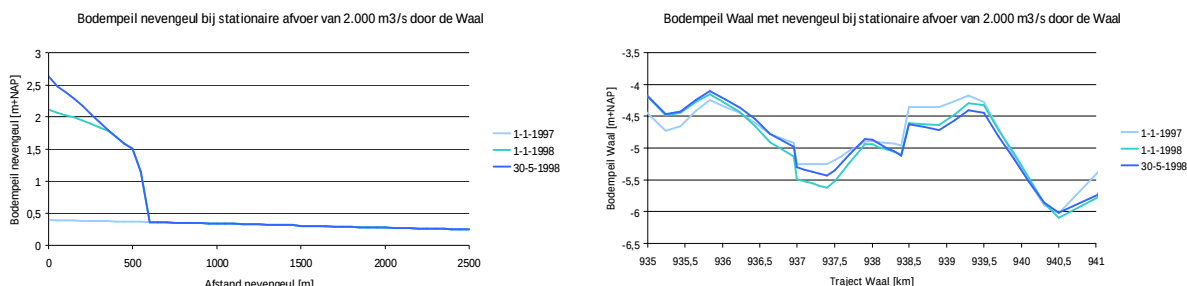


figuur 31: Situatie B: $Y = 10$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$ (links) ontwikkeling in de nevengeul (rechts) ontwikkeling in de hoofdgeul.

Situatie C ($Y > n$): morfologische ontwikkeling in het watersysteem

In situatie C in figuur 32 is een instabiele situatie ($Y < n/3$) weergegeven, waarbij parameter 'Y' gelijk is aan 0,5. In situatie C is duidelijk te zien dat er zich in korte tijd bovenstrooms van de nevengeul een sedimentatiefront heeft ontwikkeld. Dit sedimentatiefront heeft geen tijd om zich stroomafwaarts te bewegen als gevolg van de grote hoeveelheid sediment dat naar de nevengeul wordt getransporteerd. Binnen 17 maanden is de nevengeul niet meer watervoerend. Uit de analytische evenwichtsparametrisatie is gebleken dat instabiele situaties tot kleine evenwichtsdiepte verhoudingen leidt in het watersysteem ($h_{e1} < h_{e2}$). Omdat de nevengeul ongelijkwaardig is aangetakt, is de huidige waterdiepteverhouding (h_1/h_2) groter dan deze evenwichtsdiepte verhouding. Om deze reden erodeert de hoofdgeul totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is (zie instabiele situatie C in figuur 14). Als gevolg van de 1D benadering in het SOBEK-RE model kan de instroom van sediment alleen bij een splitsingspunt (bovenstrooms en benedenstrooms van de nevengeul) plaatsvinden. In werkelijkheid kan er bij relatieve hoge afvoeren over de gehele lengterichting van de nevengeul ook sedimentuitwisseling plaatsvinden tussen de hoofd- en nevengeul. Een andere beperking is dat een kanaal in SOBEK altijd watervoerend moet zijn voor de numerieke berekening. Vanwege deze beperkingen kan de morfologische ontwikkeling, die in situatie C is weergegeven, vertaald worden naar een situatie waarbij de nevengeul op korte termijn volledig dicht sedimenteert. Als gevolg van de instabiele situatie erodeert de

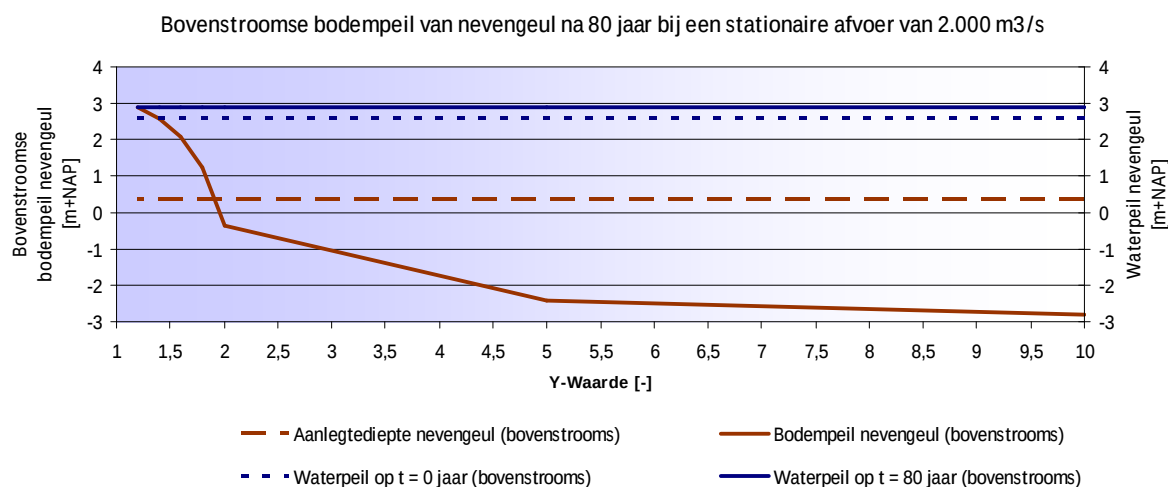
hoofdgeul totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is. Dit blijkt ook uit situatie C. Doordat het bovenstroomse bodempeil van de nevengeul echter zeer snel zal toenemen, zal de nevengeul na een korte periode vrijwel geen debiet meer onttrekken. Hierdoor zal het bodempeil van de hoofdgeul zich weer enigszins herstellen en zal er ook weer sedimentatie optreden.



figuur 32: Situatie C: $Y = 0,5$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$ (links) ontwikkeling in de nevengeul (rechts) ontwikkeling in de hoofdgeul.

Morfologische tijdschalen van de nevengeul in relatie met verschillende sedimentverdelingen

Bovenstaande situaties A, B en C (figuur 30: figuur 32) en de situaties met andere sedimentverdelingen zijn weergegeven in tabel 6 en in figuur 33. In figuur 33 zijn bij verschillende sedimentverdelingen (parameter 'Y') alleen bovenstroomse bodempeilen van de nevengeul opgenomen die, al dan niet binnen 80 jaar, een evenwichtsbodempeil bereiken. De tijdschalen waarop deze bodempeilen uit figuur 33 zijn bereikt, staan weergegeven in tabel 6. Uit figuur 33 kan eenvoudig worden afgeleid, in relatie met verschillende sedimentverdelingen, wanneer erosie of sedimentatie plaatsvindt in de SOBEK nevengeul. Onder deze stationaire afvoercondities sedimenteren nevengeulen pas bij een Y-waarde die groter is dan 2. Daarnaast is duidelijk te zien dat het bovenstrooms bodempeil van de nevengeul nauwelijks verandert, wanneer parameter 'Y' groter is dan 5. Dit heeft te maken met het feit dat dit sedimentverdelingen zijn waarbij geen sedimenttransport naar de nevengeul plaatsvindt (Appendix L).



figuur 33: In deze grafiek wordt de invloed van parameter 'Y' op de morfologische ontwikkeling van de nevengeul weergegeven in relatie met het bereikte bodempeil na een periode van circa 80 jaar. Instabiele situaties zijn hierin niet opgenomen. In de situaties waarbij $Y < 1,8$ wordt de evenwichtsdiepte in de nevengeul niet meer bereikt.

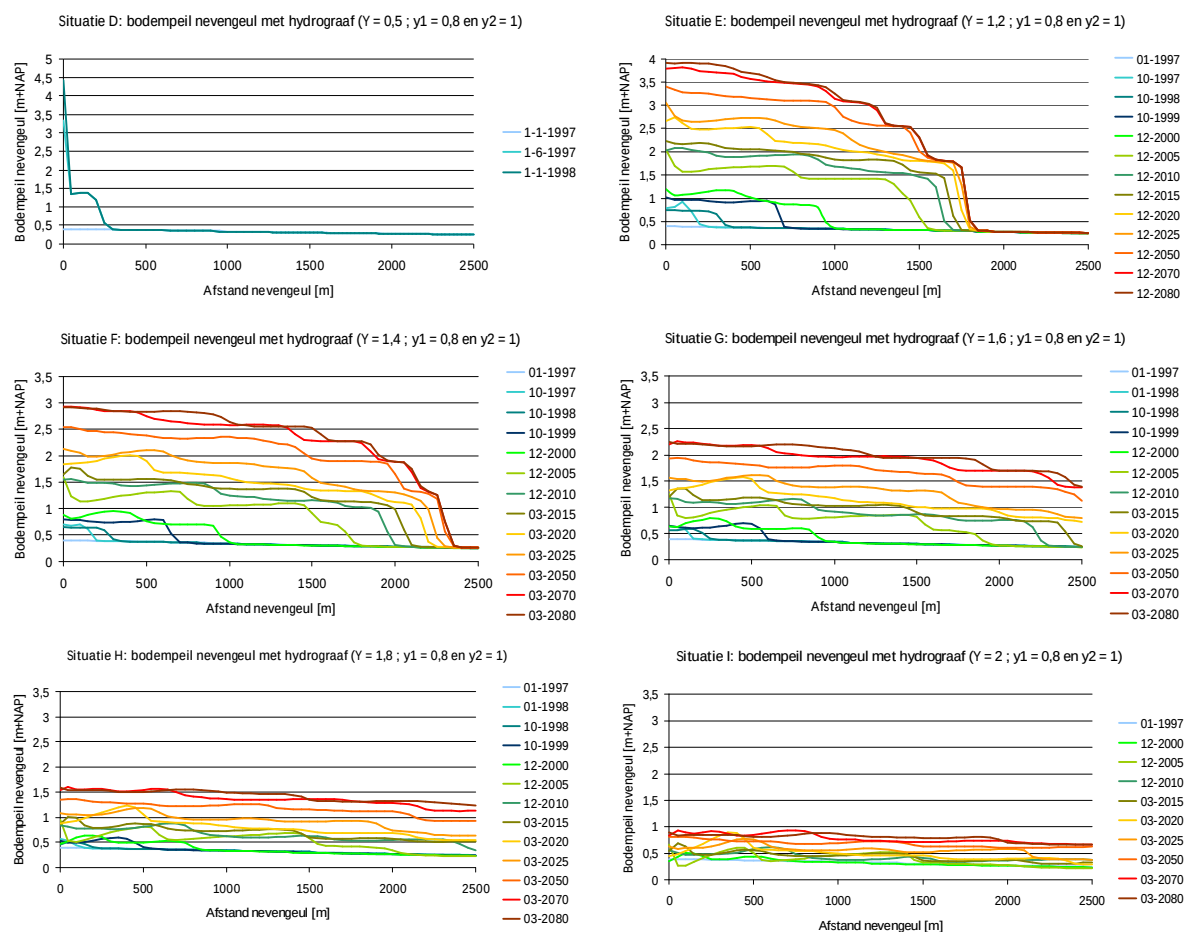
Onder stationaire afvoercondities (geulvullende) van $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ door de Waal kunnen de volgende tijdschalen aan de 3 typen sedimentverdelingen worden toegekend (tabel 6). In instabiele situaties waarbij $Y < n/3$ ($Y < 1,1$) sedimenteert de nevengeul volledig dicht binnen een periode van 0,5 tot 25 jaar. In stabiele situaties waarbij $1,1 < Y < 2$ ontstaat er sedimentatie in de nevengeul en worden evenwichtsdiepte binnen een periode van 80 jaar niet bereikt. Dit komt omdat sedimenterende nevengeulen zich zelf afknippen van de rivier. Hierbij kan de sedimentatie oplopen tot meer dan 2 meter rekening houdende met een aanlegdiepte van de nevengeul op 0,4 m +NAP. In tegenstelling tot eroderende nevengeulen ($Y > 2$) worden evenwichtsdieptes wel bereikt binnen een periode van 25 á 70 jaar en kan de erosie oplopen tot meer dan 3 meter.

tabel 6: Bovenstrooms (evenwichts)bodempeilen van de nevengeul bij een afvoer van 2.000 m³/s door de Waal. Deze simulaties zijn gestart op 01/01/1997 met een bovenstrooms bodempeil van 0,4 m+NAP voor de nevengeul.

Y-waarde	Bodempeil in 2080 (m+NAP)	Ontwikkeling	Evenwicht in nevengeul	Tijdsduur evenwicht [d/m/jaar]	Q ₂ in 1997 [m ³ /s]	Q ₂ in 2080 [m ³ /s]
0,2	2,60	Sedimentatie	Instabiel, volledige sedimentatie	1997/04/14 (z _w < z _b)	25	0
0,5	2,64	Sedimentatie	Instabiel, volledige sedimentatie	1998/05/31 (z _w < z _b)	25	0
1,0	2,80	Sedimentatie	Instabiel / stabiel	2023/10/15 (z _w < z _b)	25	0
1,2	2,90	Sedimentatie	Stabiel, evenwicht niet bereikt	2080 (z _w < z _b)	25	0
1,4	2,57	Sedimentatie	Stabiel, evenwicht niet bereikt	2080	25	1
1,6	2,08	Sedimentatie	Stabiel, evenwicht niet bereikt	2080	25	4
1,8	1,22	Sedimentatie	Stabiel, evenwicht niet bereikt	2080	25	16
2,0	-0,37	Erosie	Stabiel, evenwicht bereikt	2070	25	57
5,0	-2,41	Erosie	Stabiel, evenwicht bereikt	2040	25	146
10,0	-2,80	Erosie	Stabiel, evenwicht bereikt	2020	25	166

7.2 Morfologische ontwikkelingen met SOBEK nevengeul met een hydrograaf

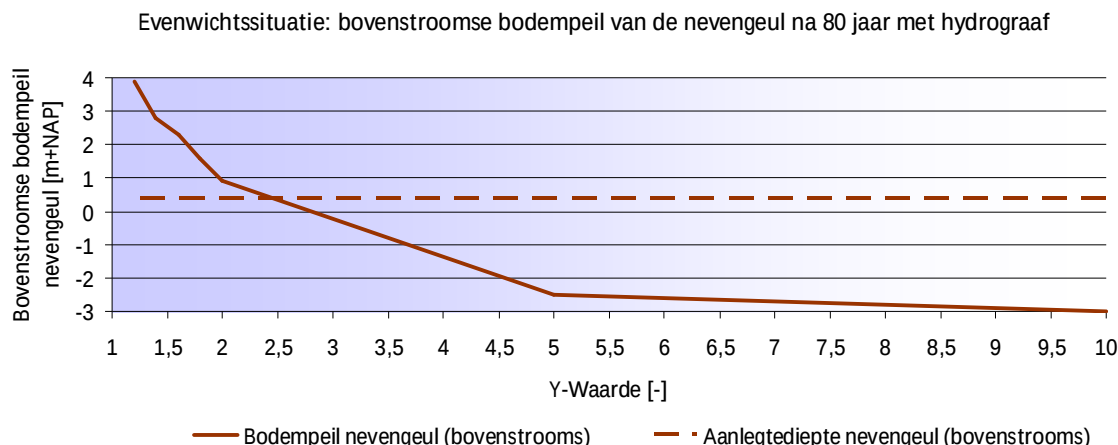
In werkelijkheid is de afvoer door de Waal variabel, waardoor in een periode van circa 80 jaar andere bodempeilen in de nevengeul kunnen worden bereikt. Om deze reden worden de situaties, die bij de stationaire afvoercondities zijn doorgerekend, ook doorgerekend met een hydrograaf. Uit deze analyse is gebleken, dat sedimenterende nevengeulen nu beter een evenwichtsituatie naderen/bereiken, zie situaties G tot en met I. Dit komt omdat er in de hydrograaf nu ook hogere afvoeren zijn opgenomen, waardoor de nevengeul nog redelijk kan mee stromen ondanks de sedimentatie die er is opgetreden, in tegenstelling tot de situaties A tot en met C waarbij met een stationaire afvoer is gerekend van 2.000 m³/s.



figuur 34: Morfologische ontwikkeling in nevengeul met hydrograaf waarbij Y = 0,5 tot Y = 2

Morfologische tijdschalen van de nevengeul in relatie met verschillende sedimentverdelingen

Uit deze analyse is gebleken dat bodempeilen, die door de nevengeul bij stabiele situaties in een periode van circa 80 jaar zijn bereikt, iets hoger liggen dan bij stationaire afvoersituaties (vergelijk figuur 33 met figuur 35). Dit verschil kan verklaard worden, omdat in de hydrograaf nu ook meerdere hogere afvoeren zijn opgenomen. Hoe hoger het waterpeil op het splitsingspunt, hoe meer debiet en sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd (Appendix L). Dit kan een verklaring zijn, waarom deze bovenstroomse bodempeilen met een hydrograaf iets hoger kunnen zijn als gevolg van een kleinere evenwichtdiepte in de nevengeul. De overgang van erosie en sedimentatie in de nevengeul ontstaat nu bij een 'Y'-waarde die gelijk is aan 2,4. Deze waarde ligt dus iets hoger dan de 'Y'-waarde uit stationaire berekening zijnde 1,9 (figuur 33).



figuur 35: In deze grafiek is de invloed van parameter 'Y' (sedimentverdeling) op de morfologische ontwikkeling van de nevengeul weergegeven in relatie met het bereikte bodempeil na een periode van circa 80 jaar. In de situaties waarbij $Y < 1,4$ wordt de evenwichtdiepte in de nevengeul niet meer bereikt.

In de situaties met een hydrograaf kan er op basis van parameter 'Y' minder goed een onderscheid worden gemaakt tussen stabiele en instabiele situaties. Dit komt omdat parameter 'n', die afhankelijk is van de afvoer, variabel is. Om deze reden is er geen eenduidige parameter 'Y' aan te wijzen, die een onderscheid maakt tussen een stabiele ($Y > n/3$) en een instabiele ($Y < n/3$) evenwichtssituaties. Toch kan er op basis van de ontwikkelingen en de tijdschalen wel degelijk een onderscheid worden gemaakt. Uit tabel 7 en situatie D volgt dat binnen een termijn van 1 á 10 jaar de nevengeul niet meer watervoerend is. Door de korte tijdschalen blijken dit instabiele situaties te zijn, waardoor de overgang tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties zich lijkt te vormen bij een Y-waarde van 1,1. In situaties waarbij $1,1 < Y < 2,5$ treedt er sedimentatie op in de nevengeul (figuur 35 en tabel 7). Hierbij kan de sedimentatie oplopen tot 3,5 meter in een periode van 80 jaar. Merk op dat de morfologische ontwikkeling in sedimenterende nevengeulen steeds langzamer verloopt, waardoor het bodempeil bovenstrooms van de nevengeul met 1 meter zowel kan toenemen in een periode van 3 jaar (situatie E) als in een periode van 20 jaar (situatie H). Wel kunnen er evenwichtsdieptes bereikt worden, wanneer het sedimentatiefront bovenstrooms in de nevengeul niet te hoog wordt (situaties H en I). Wanneer ' $Y > 2,5$ ' treedt er erosie op in de nevengeul, die binnen een termijn van 80 jaar kan oplopen tot 3 meter beneden de aanlegdiepte van 0,4 m+NAP.

tabel 7: Bovenstroomse (evenwichts)bodempeilen van de nevengeul met een hydrograaf van circa 80 jaar. In onderstaande situaties zijn de simulaties gestart op 01/01/1997 met een bovenstrooms bodempeil van 0,4 m+NAP voor de nevengeul.

Y -waarde	Bodempeil in 2080 (m+NAP)	Sedimentatie / erosie	Evenwicht	Tijdsduur evenwicht
0,5	4,40	Sedimentatie ($z_w < z_b$)	Nee, instabiel	01/01/1998
1,0	2,83	Sedimentatie ($z_w < z_b$)	Nee, instabiel	29/09/2006
1,2	3,9	Sedimentatie	Nee, stabiel	2080
1,4	2,91	Sedimentatie	Ja / Nee, stabiel	2080
1,6	2,24	Sedimentatie	Ja, stabiel	2080
1,8	1,58	Sedimentatie	Ja, stabiel	2080
2,0	0,89	Sedimentatie	Ja, stabiel	2080
5,0	-2,5	Erosie	Nee / ja, stabiel	2080
10,0	-3	Erosie	Nee /Ja, stabiel	2080

7.2.1 Morfologische ontwikkelingen in SOBEK-nevengeul in vergelijking met Gameren

Uit paragraaf 7.2 is gebleken dat in situaties waarbij $1,1 < Y < 2,5$ er sedimentatie optreedt in de SOBEK nevengeul. Doordat de sedimentverdelingsprocessen nog niet volledig kwantitatief beschreven zijn, is het nog niet mogelijk om vooraf de sedimentverdeling (Y-waarde) te bepalen voor een nevengeul. Om toch meer inzicht te krijgen in sedimentverdelingen (Y-waarde) die zich in de praktijk kunnen voordoen wordt er in deze paragraaf een Y-waarde afgeleid, die globaal overeenkomt met de morfologische ontwikkelingen die zich in de praktijk in Gameren hebben voorgedaan. De redenen voor deze keuze zijn geweest dat i) hier sedimentatie heeft plaatsgevonden, ii) deze in het verleden ook morfologisch gemonitord zijn. Aandachtspunt is wel de interactie tussen deze drie nevengeulen, die ongetwijfeld de morfologische ontwikkeling in de nevengeulen van Gameren zal beïnvloeden. Het is om deze reden niet reëel om parameter 'Y' voor de SOBEK nevengeul (solitair) nauwkeurig te kalibreren op Gameren. Echter tot op heden zijn er geen andere praktijkvoorbeelden beschikbaar die aan bovenstaande randvoorwaarden voldoen (zie paragraaf 5.3). Toch kunnen de morfologische ontwikkelingen van Gameren een globaal inzicht geven welke waarden van parameter 'Y' zich in de praktijk kunnen voordoen bij sedimenterende nevengeulen. Afhankelijk van de geometrie en ligging van de nevengeul, zoals beschreven in paragraaf 3.4.3, zal een nevengeul meer (resp. minder) sediment naar de nevengeul transporteren, waardoor parameter 'Y' in splitsingspunt relatief lager (resp. hoger) zal worden.

In dit onderzoek is ervoor gekozen om de morfologische ontwikkeling van de Grote-Geul te vertalen naar parameter 'Y'. Dit omdat de Grote-Geul de meeste overeenkomsten vertoont met de SOBEK nevengeul. De Grote-Geul is namelijk niet voorzien van een drempelconstructie, is bovenstrooms aangelegd op een diepte van 0 m +NAP en heeft een lengte van ongeveer 2000 meter. De gemiddelde stijging van het bodempeil van de permanente nevengeul (Grote Geul) is vastgesteld op 0,05 (ondiepere delen) tot 0,11 (diepere delen) meter per jaar. Dit is ongeveer 0,08 meter per jaar stijging en nagenoeg gelijk aan de gemiddelde stijging van de bodemhoogte in de periodieke nevengeulen (Jans, 2004). Dit betekent dat na een periode van 4 jaar de bodemhoogte in deze nevengeulen met 0,3 meter is gestegen. Deze sedimentatiesnelheden zijn terug te zien in de SOBEK-nevengeul bij een Y-waarde die gelijk is aan 1,4. Op basis hiervan is het te verwachten dat voor nevengeulen die meer sediment onttrekken (bijvoorbeeld door aanleg in binnenbocht) de 'Y' waarden kleiner zullen zijn dan 1,4 en voor nevengeulen die minder sediment onttrekken (bijvoorbeeld door aanleg in buitenbocht) de Y-waarden hoger zullen zijn dan 1,4. Natuurlijk blijft deze analyse een grove benadering en is gebaseerd op één nevengeul die bovendien beïnvloed wordt door andere nevengeulen, waardoor de resultaten met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden.

7.2.2 Instabiele evenwichtssituaties in het watersysteem versus praktijkervaring

Uit bovenstaande numerieke analyses met de SOBEK nevengeul is gebleken, dat nevengeulen (bovenstrooms) binnen 10 jaar volledig dicht kunnen sedimenteren in geval van instabiele situaties waarbij $Y < 1,1$ (tabel 6 en tabel 7). Tot op heden zijn meestromende nevengeulen in de Rijntakken, na een periode van circa 10 jaar, nog steeds niet volledig dicht gesedimenteerd (tabel 1). Instabiele situaties hebben zich dus nog niet voorgedaan in de praktijk. Blijkbaar wordt tot op heden de sedimentinstroom naar de nevengeul, door de wijze waarop de huidige nevengeulen zijn en worden aangelegd (paragraaf 3.4.3), voldoende gereduceerd. Toch kan niet volledig uitgesloten worden, dat instabiele situaties zich in de huidige nevengeulen of in andere nevengeulen niet zullen voordoen. Volgens Kleinhans (2008) kan parameter 'Y' (sterk) variëren, als gevolg van morfologische ontwikkelingen (dwarshellingen) en bodemvormen, waardoor het mogelijk is dat het watersysteem in de tijd kan variëren tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties. Hierop door redenerend kan het bijvoorbeeld zo zijn dat instabiele situaties vanzelf weer stabiel worden. Door de sterke sedimentatie in de nevengeul neemt de sedimentinstroom naar de nevengeul af. Dit omdat de afvoer naar de nevengeul steeds kleiner wordt. Dit verschijnsel gebeurt ook in de splitsingspuntrelatie, maar dan wel bij een constante parameter 'Y'. Met andere woorden: het kan zo zijn dat in de praktijk, bij dezelfde afvoerverdeling, een lagere of een hogere sedimentinstroom naar de nevengeul plaatsvindt bij de instroomopening dan dat volgt uit de splitsingspuntrelatie (Appendix L). Indien dit het geval is, zal dus een hogere of een lagere Y-waarde genomen moeten worden en kunnen er dus overgangen plaatsvinden tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties. Juist bij nevengeulen, die nog maar net verwijderd zijn van een instabiele situatie, kunnen deze overgangen plaatsvinden. Zo bevinden de nevengeulen van Gameren zich dichtbij een Y-waarde die gelijk is aan 1,4. Dit betekent dat de nevengeulen van Gameren zich min of meer dicht bij een instabiele evenwichtssituatie bevinden. Dit is ook volgens de verwachting omdat er aanzienlijke sedimentatie optreedt.

7.3 Interventiemoment vanuit veiligheid versus onderhoudstermijnen aan nevengeulen

Voor de veiligheid moeten nevengeulen over voldoende afvoercapaciteit beschikken in relatie tot het reduceren van de maatgevende hoogwaterstanden in de rivier. Deze benodigde afvoercapaciteit kan in de praktijk echter afnemen door zowel sedimentatie als door verhoging van de stromingsweerstand als gevolg van vegetatieontwikkeling. In dit onderzoek wordt verondersteld, dat de vegetatieontwikkeling voldoende laag gehouden kan worden door middel van natuurlijke begrazing en valt dus buiten het kader van dit onderzoek (zie inleiding hoofdstuk 1).

Ook is het belangrijk om op te merken dat de totale afvoercapaciteit van het riviersysteem (hoofdgeul en nevengeul) niet per definitie direct hoeft af te nemen wanneer de nevengeul zich morfologisch ontwikkelt (bijvoorbeeld door sedimentatie). In feite vormen de hoofd- en nevengeul één systeem waardoor sedimentatie in de nevengeul gevolgd wordt door erosie in de hoofdgeul of andersom. Dit blijkt ook uit de evenwichtsanalyse in figuur 11 waarbij een afname (resp. toename) in de evenwichtsdiepte van de nevengeul altijd gepaard gaat met een toename (resp. afname) van de evenwichtsdiepte in de hoofdgeul. In de praktijk ligt de hoofdgeul (rivier de Waal) niet om nabij een evenwicht doordat er continu gebaggerd wordt. Dit omdat de evenwichtsdiepte in de Waal blijkbaar kleiner is dan de gewenste waterdiepte die benodigd is voor verschillende rivierfuncties (bijvoorbeeld vaardiepte in het belang van de scheepvaart). In deze situaties zullen ontwikkelingen in nevengeulen wel eerder tot een afname leiden van de totale afvoercapaciteit van het riviersysteem.

Om meer inzicht te krijgen in de invloeden van de morfologische ontwikkelingen in de nevengeul in relatie met het reduceren van de maatgevende hoogwaterstanden, is de SOBEK nevengeul bij verschillende morfologische ontwikkelingen doorgerekend bij een maatgevende afvoer van 11.700 m³/s door de Waal. Hieruit blijkt in eerste instantie dat de ontwikkelingen (sedimentatie van 0 tot circa 2 meter) in de nevengeul weinig invloed heeft op de debietonttrekking van de nevengeul bij hoogwatersituaties. Hierbij zijn de verschillende morfologische ontwikkelingen in de nevengeul op een gekozen tijdstip meegenomen via 'restart files' uit eerder gemaakte simulaties. Doordat de effecten op de waterstanden zeer divers zijn kan geconcludeerd worden dat de bodempelen van de hoofdgeul, die automatisch worden meegenomen via de 'restart files', de effecten van de morfologische ontwikkelingen van de nevengeul beïnvloeden en geven dus een verkeerd beeld.

In dit onderzoek wordt daarom verondersteld dat het kritische bodempeil in een nevengeul wordt bereikt zodra circa 10 procent van het doorstroom oppervlak, ten opzichte van de aanlegssituatie, in een nevengeul dicht gesedimenteerd is. Het instroompeil van de nevengeul is gelegen op 0,4 m+NAP en resulteert, wanneer geen sedimentatie is opgetreden, bij een peil van 5 m+NAP in een doorstroom oppervlak van 252 m². De SOBEK nevengeul heeft globaal 10 procent van zijn doorstroom oppervlak verloren zodra het bodempeil (bovenstrooms) gelijk is aan 1,5 m+NAP. Bij dit kritische bodempeil van 1,5 m+NAP ligt de stroomvoerendheid van de geul nog globaal op 8 maanden, zie ook tabel 8.

tabel 8: verlies in doorstroom oppervlak van nevengeul versus sedimentatiehoogte in relatie met de stroomvoerendheid van de ongelijkwaardige nevengeul.

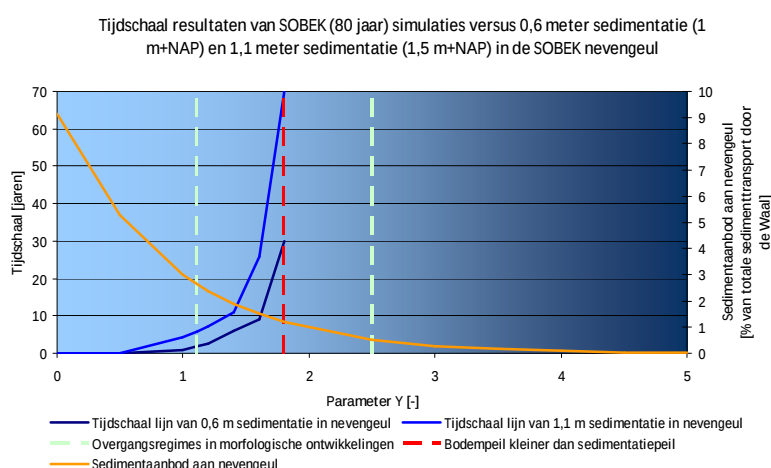
Aanzandingshoogte [m]	Enkel talud breedte [m]	Totale profiel breedte [m]	Aanzanding doorstroom oppervlak [m ²]	procentuele aanzanding doorstroom oppervlak [%]	Aanzanding in totale nevengeul [m ³]	Waal afvoer [m ³ /s]	Waterpeil [m+NAP]	Overschrijdingsduur [maanden]
0,0	10,0	10	0	0	0	563	0,4	12
0,5	4,9	20	7	3	7.373	875	0,9	10,9
1,0	9,7	29	20	8	19.576	1176	1,4	8,24
1,5	14,6	39	37	15	36.608	1471	1,9	5,29
2,0	19,5	49	59	23	58.469	1765	2,4	3,41
3,0	29,2	68	118	47	116.681	2462	3,4	1,85
4,0	39,0	88	196	78	194.210	3300	4,4	1,56
4,6	44,8	100	252	100	250.000	3900	5,0	1,36

Eenzijds hoeft er pas in de morfologische ontwikkeling van sedimenterende nevengeulen te worden ingegrepen zodra het kritische bodempeil (1,5 m+NAP in SOBEK nevengeul), in relatie tot het reduceren van maatgevende hoogwaterstanden, is overschreden. Anderzijds wordt het inzetten van de maatregelen bepaald door het effect van de maatregel op de morfologische ontwikkeling. Maatregelen die de morfologische ontwikkeling van nevengeulen vertragen moeten in principe eerder ingezet worden dan maatregelen die erosie kunnen veroorzaken. Niettemin moeten maatregelen die erosie kunnen veroorzaken ook tijdig worden ingezet, doordat de effectiviteit van deze maatregelen afneemt naarmate de nevengeul zich steeds verder morfologisch ontwikkelt. Dit komt enerzijds doordat de watervoerendheid en het debiet naar de nevengeul afneemt naarmate het bodempeil bovenstrooms van de nevengeul steeds hoger komt liggen. Anderzijds bij een hoger liggende bodempeil zijn steeds grotere afvoeren benodigd om sedimenttransporterende stroomsnelheden in de nevengeul te verkrijgen. Dit omdat de breedte van de nevengeul steeds groter wordt waarbij het effect nog eens vergoot wordt naarmate de oevers van de nevengeul flauw worden aangelegd uit het oogpunt van ecologie. Om bovenstaande redenen kan het in sommige gevallen nodig zijn om eerder in te grijpen dan het kritieke bodempeil van 1,5 m+NAP (1,1 meter sedimentatie), bijvoorbeeld al op 1,0 m +NAP (0,6 meter sedimentatie) in de SOBEK nevengeul.

Het verloop van de morfologische ontwikkelingen in de SOBEK nevengeul en de bijbehorende tijdschalen blijven binnen dit onderzoek weliswaar nog een benadering:

- als gevolg van de 1D schematisatie vindt er geen uitwisseling van sediment plaats over de hoger gelegen delen van de nevengeul (over gehele lengterichting) tijdens hogere afvoercondities;
- als gevolg van de 1D schematisatie ontstaan er geen zandbanken in de nevengeul;
- parameter 'Y' wordt in de splitsingspuntrelatie constant gehouden, terwijl deze in werkelijkheid variabel kan zijn. Hierdoor kan de sterke morfologische dynamiek in een nevengeul niet goed meegenomen worden;
- in het model wordt een dominant bodemtransport formule gebruikt waarmee het totaal sedimenttransport door de Rijntakken wordt berekend. Hierbij wordt de 'wash load', het fijn sediment dat zich niet op de rivierbodem bevindt, buiten beschouwing gelaten. In hoeverre dit de tijdschalen en de lange termijn ontwikkeling van de nevengeul beïnvloedt, hangt af of dit type sediment ook daadwerkelijk voor een relatieve lange periode in de nevengeul netto wordt afgezet;
- De korrelgrootte (D_{50}) van de nevengeul is hier gelijk aan 0,001 meter (paragraaf 6.2). Deze bepaalt wel hoe snel sediment wordt meegenomen en heeft dus een invloed op de morfologische ontwikkeling.

In relatie met bovenstaande punten en het interventiemoment tussen een bodempeil van 1,0 en 1,5 m+NAP kan er voor de SOBEK nevengeul een onderhoudstermijn bepaald worden zoals weergegeven in figuur 36.



figuur 36: Tijdschalen van het interventie moment (1,0 – 1,5 m+NAP) versus sedimentverdelingen in de SOBEK nevengeul.

Hieruit volgt dat in stabiele situaties ($1,1 < Y \leq 1,8$) een onderhoudstermijn verwacht kan worden van 3 á 70 afhankelijk van het interventiemoment en de sedimentverdeling (parameter 'Y'). Bij relatieve lage Y-waarden maar nog steeds stabiel, zal er onderhoud uitgevoerd moeten worden binnen een termijn van 5 á 15 jaar.

7.4 Conclusies morfologische ontwikkelingen in nevengeulen

De morfologische ontwikkeling van een nevengeul (resp. hoofdgeul) wordt sterk beïnvloed door de heersende sedimentverdeling (parameter Y). In geval van sedimenterende nevengeulen vormt zich een sedimentatiefront, dat in de tijd stroomafwaarts beweegt en in hoogte toeneemt. Omdat het sedimentatiefront steeds hoger wordt, stroomt de nevengeul steeds minder vaak mee en wordt er steeds minder sediment naar de nevengeul getransporteerd als gevolg van een grotere afvoerverdeling ($Q_1 > Q_2$). Beide processen zorgen ervoor dat de verdere ontwikkeling van het sedimentatiefront in de nevengeul steeds langzamer verloopt, doordat de nevengeul zichzelf afknijpt van de rivier. Als gevolg van de scheve sedimentverdelingen op het splitsingspunt leidt dit ook tot morfologische ontwikkelingen in de hoofdgeul. Omdat de breedte van de nevengeul veel kleiner is dan de breedte van de hoofdgeul leiden grote morfologische ontwikkelingen in de nevengeul in principe maar tot relatief kleine morfologische ontwikkelingen in de hoofdgeul. Toch, wanneer er in verhouding teveel debiet wordt onttrokken aan de hoofdgeul, kan er relatief sterke aanzanding in de hoofdgeul optreden (figuur 31).

Zowel uit de analytische als uit de numerieke simulaties (stationair en hydrograaf) kunnen de morfologische ontwikkelingen in de SOBEK nevengeul in 3 regimes gekarakteriseerd worden in relatie met verschillende sedimentverdelingen (parameter Y). De overgangen tussen deze regimes verschillen enigszins tussen de stationaire en hydrograaf situaties. Dit heeft te maken met het feit dat er bij de hydrograaf waarschijnlijk meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Merk op dat deze overgangen zullen verschuiven, wanneer de geometrie van de nevengeul anders wordt. Onderstaand zijn de overgangswaarden in parameter ' Y ' aangegeven zoals deze naar voren zijn gekomen uit de numerieke simulaties met de hydrograaf (paragraaf 7.2) in de SOBEK nevengeul. Hierbij zal parameter ' Y ' relatief lager worden voor een nevengeul i) wanneer deze in een binnenbocht is gelegen ii) niet voorzien zijn van drempel- of andere regulerende constructies iii) die meer onttrekken dan 3 procent van de afvoer bij geulvullende afvoercondities van het zomerbed.

- sedimentverdelingen waarbij de SOBEK nevengeul altijd volledig dicht sedimenteert ($Y < 1,1$);
- sedimentverdelingen waarbij sedimentatie ontstaat in de SOBEK nevengeul ($1,1 < Y < 2,5$);
- sedimentverdelingen waarbij erosie verwacht kan worden in een nevengeul ($Y > 2,5$).

In het geval van instabiele situaties ($Y < 1,1$) sedimenteert de SOBEK nevengeul volledig dicht binnen een termijn van 10 jaar (zie tabel 7). Echter deze ontwikkelingen hebben zich in de praktijk tot op heden nog niet voorgedaan. Toch kan niet volledig uitgesloten worden, dat instabiele situaties zich in de huidige nevengeulen en in toekomstige nevengeulen niet zullen voordoen. Volgens Kleinhans (2008) kan parameter ' Y ' variëren, als gevolg van morfologische ontwikkelingen (dwarshellingen) en bodemvormen, waardoor het mogelijk is dat het watersysteem in de tijd kan variëren tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties (paragraaf 7.2.2). De morfologische ontwikkelingen van de nevengeulen in Gameren, die in begin buitenbocht liggen, kunnen globaal vertaald worden naar een Y -waarde van 1,4 (paragraaf 7.2.1). Dit schept de verwachting dat voor nevengeulen die meer sediment onttrekken (bijvoorbeeld aanleg in een binnenbocht) de Y -waarde kleiner zal zijn dan 1,4 en hierdoor instabiel kunnen worden. Dit is echter gebaseerd op slechts één nevengeul, die beïnvloed wordt door andere nevengeulen, waarom de resultaten met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd moeten worden. Omdat de nevengeulen in een instabiele situatie volledig kunnen aanzanden, is het dus essentieel om te achterhalen in hoeverre sedimenterende nevengeulen verwijderd zijn van een instabiele situatie. Ook is het belangrijk om te weten in hoeverre de sedimentverdeling kan veranderen tijdens de morfologische ontwikkeling van een nevengeul. Er is dus behoefte aan meer monitoring gegevens betreffende de morfologische ontwikkeling in solitair sedimenterende nevengeulen.

In het geval van stabiele situaties ($1,1 < Y < 2,5$) blijft de SOBEK nevengeul altijd open en treedt er sedimentatie op (figuur 34). In dit onderzoek is verondersteld, dat wanneer 10 procent van het doorstroom oppervlak van de nevengeul dicht gesedimenteerd is, er vanuit het oogpunt van veiligheid moet worden ingegrepen (paragraaf 7.3). Hierbij moet worden ingegrepen wanneer de nevengeul bovenstrooms een bodempcil bereikt van 1 á 1,5 m+NAP. Dit betekent voor rivierbeheerders dat ze een onderhoudstermijn kunnen verwachten van 3 á 70 jaar in de SOBEK nevengeul bij sedimentverdelingen waarbij $1,1 < Y \leq 1,8$ (figuur 36). Deze termijnen kunnen dus een conflict vormen met cyclisch beheer, waarbij minimaal een termijn van 20 á 30 jaar wordt gehanteerd (Duel, Baptist & Penning, 2001). Om deze reden wordt in dit onderzoek een verkenning gemaakt naar sedimentbeheersende maatregelen die in eerste instantie tijdelijk kunnen worden ingezet, om de ontwikkelingen te vertragen of door te terug te zetten door middel van 'flushen' (doorspoelen).

8 Ontwikkelen sedimentbeheersende maatregelen

Volledige sedimentatie van nevengeulen (instabiele situaties) op korte termijn (< 10 jaar) heeft in de praktijk nog niet plaatsgevonden. Wel kunnen nevengeulen, afhankelijk van de sedimentverdeling (parameter 'Y'), sedimentatie ondervinden van een 0,5 -1,1 meter binnen een termijn van 3 á 70 jaar (figuur 36). Bij sedimenterende nevengeulen, waarbij de sedimentverdeling ligt tussen $1,1 < Y \leq 1,6$ kunnen de doelstellingsfuncties veiligheid en ecologie een conflict vormen met de termijn van grootschalig onderhoud. Om de benodigde afvoercapaciteit van het riviersysteem te behouden moet er aan deze nevengeulen binnen een termijn van 3 á 30 jaar (grootschalig) onderhoud verricht worden. In deze nevengeulen zal dus eerder onderhoud moeten plaatsvinden dan dat wenselijk is vanuit cyclisch beheer, waarbij globaal een termijn van 20 á 30 jaar wordt aangehouden (Duel, Baptist & Penning, 2001).

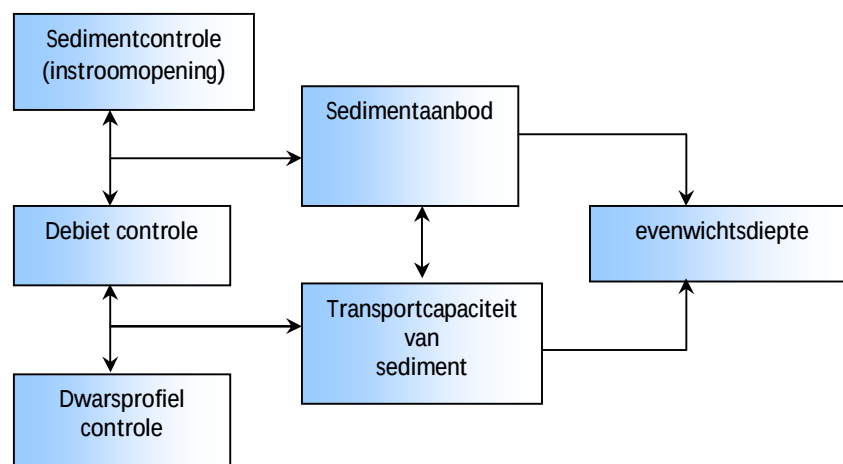
Om deze onderhoudstermijnen beter op elkaar af te stemmen worden er in dit onderzoek verschillende sedimentbeheersende maatregelen ontwikkeld, die rivierbeheerders en nevengeulontwerpers eventueel kunnen toepassen, om het onderhoudsconflict tussen deze doelstellingsfuncties veiligheid en ecologie zo goed mogelijk op te lossen. Vervolgens worden ook deze effecten van de sedimentbeheersende maatregelen op de morfologische ontwikkeling van nevengeulen bepaald. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat een nevengeul met een vrije inlaat (geen drempelconstructies) is aangetakt aan de rivier. Bij de ontwikkeling van deze maatregelen wordt er ook rekening gehouden met het belang van de scheepvaart, dat een belangrijke rol speelt bij de Nederlandse rivieren. Dit alles om te analyseren in hoeverre deze maatregelen ook daadwerkelijk een bijdrage kunnen leveren aan het oplossen van het onderhoudsconflict tussen de nevengeulfuncties veiligheid en ecologie.

Voordat verschillende maatregelen worden ontwikkeld, wordt er eerst in paragraaf 8.1 een indeling gemaakt in de verschillende typen maatregelen. In dit onderzoek wordt verondersteld dat er te allen tijde moet worden voldaan aan de veiligheidsfunctie. In paragraaf 7.3 is het interventie moment bepaald waarop sedimentbeheersende maatregelen ingezet moeten worden in de SOBEK nevengeul. In hoofdstuk 9 worden de effecten bepaald van deze sedimentbeheersende maatregelen.

8.1 Onderscheiden van verschillende typen sedimentbeheersende maatregelen

De morfologische ontwikkeling in een hoofd- en nevengeul wordt bepaald door de sediment- en afvoerverdeling tussen beide kanalen. Alleen wanneer de in- en uitstroom van het sediment aan elkaar gelijk is, kan er een evenwicht bereikt worden in een kanaal, waarbij netto geen langdurige erosie of sedimentatie plaatsvindt, zie ook figuur 1. Er treedt in een kanaal sedimentatie (resp. erosie) op wanneer de sedimentinstroom groter (resp. kleiner) is dan de uitstroom van het sediment. Op basis van deze principes heeft Ghimire (2003) een drietal type maatregelen kunnen onderscheiden bestaande uit:

- sedimentreducerende maatregelen bij de instroomopening;
- debiet regulerende maatregelen;
- dwarsprofiel regulerende maatregelen.



figuur 37: Schema van typen maatregelen uit Ghimire (2003)

Deze onderverdeling van maatregelen zijn ook geschematiseerd in figuur 37, waaruit duidelijk kan worden afgeleid dat sedimentreducerende of dwarsprofielregulerende maatregelen altijd in ogenschouw genomen moeten worden met de debietverandering naar de nevengeul. Dit komt omdat in veel gevallen, wanneer door een maatregel een verandering optreedt in de instroom van het sediment (resp. in de uitstroom van sediment), er tegelijkertijd een verandering kan optreden in het debiet naar de nevengeul. Vervolgens leidt dit weer tot een verandering in de uitstroom van het sediment (resp. instroom van het sediment). Dit verschijnsel zal in het algemeen een grotere rol spelen bij dwarsprofiel regulerende maatregelen dan bij sedimentreducerende maatregelen.

Een ander type maatregel (niet constructieve maatregel) kan eventueel gezocht worden in het ontwerp van de nevengeul. Uit de analytische en numerieke analyses, op de morfologische ontwikkeling van nevengeulen, is gebleken dat een nevengeul een evenwichtsdiepte bereikt/nadert binnen een termijn van circa 80 jaar. Wanneer een nevengeul in de ontwerpfase zo wordt aangelegd waarbij de waterdiepte kleiner (resp. groter) is dan de evenwichtsdiepte wordt sedimentatie (resp. erosie) van de nevengeul indirect al opgelegd. Een nevengeul kan dus morfologisch ‘neutraal’ worden aangelegd door een nevengeul meteen op de juiste evenwichtsdiepte aan te leggen. Hierbij is er wel sedimenttransport naar de nevengeul maar treedt er geen langdurige erosie of sedimentatie op in de nevengeul in relatie met waterdiepteverstoringen.

De overige maatregelen die genomen kunnen worden bij (sterk) sedimenterende nevengeulen zijn:

- het plaatsen van een sedimentvang bovenstrooms in de nevengeul;
- baggeren.

Van deze maatregelen is echter al duidelijk dat ze de morfologische ontwikkeling van nevengeulen sterk kunnen beïnvloeden. Enerzijds zullen sedimentvangen de sedimentatiesnelheid in nevengeulen doen afnemen, waarbij eventueel zelfs erosie in de nevengeul kan ontstaan, in het geval dat te veel sedimentarm water naar de nevengeul wordt getransporteerd (er wordt te veel sediment afgevangen). Anderzijds kunnen grotere waterdieptes juist zorgen voor een verhoging van de stroomsnelheid bij relatieve hoge afvoeren. Met baggeren kan de morfologische ontwikkeling van nevengeulen weer terug gezet worden naar het oorspronkelijk aangelegde bodempeil.

Echter de doelstelling van dit onderzoek is het ontwikkelen van andere maatregelen, die eventueel toegepast kunnen worden bij sedimenterende nevengeulen. Om deze reden worden onderstaand de andere typen maatregelen uitgewerkt in vorm van conceptuele maatregelen.

8.2 Sedimentreducerende maatregelen

In deze paragraaf wordt een beknopt overzicht gegeven van mogelijke sedimentreducerende maatregelen (constructies) die bovenstrooms toegepast kunnen worden bij sedimenterende nevengeulen. Sedimentreducerende maatregelen kunnen hoofdzakelijk alleen de instroom van het sediment reduceren, dat via bodemtransport naar de nevengeul wordt getransporteerd. Sediment in suspensie kan zich over de hele waterkolom bevinden (figuur 2), waardoor dit type sediment niet gemakkelijk buitengesloten kan worden wanneer de nevengeul stroomvoerend moet blijven. Dit geldt specifiek voor ‘wash load’ waarbij het fijne sediment (slib) zich meestal in hogere delen van de waterkolom bevindt. In het verleden zijn al een aantal studies gedaan naar mogelijke sedimentreducerende maatregelen zoals beschreven in Ghimire (2003) en Ankum & Brouwer (1993). Uit deze studies zijn hoofdzakelijk de onderstaande sedimentreducerende maatregelen (constructies) naar voren gekomen:

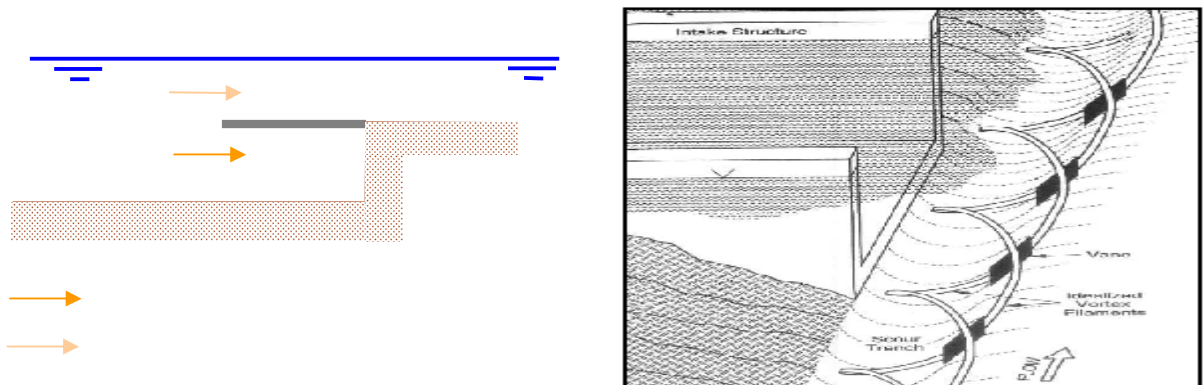
- drempel- en luifelconstructies;
- speermuur / GIBB’s GROUYNE;
- bodemschermen, drijvende schermen en bandalls;
- stroomgeleidende wanden.

8.2.1 Drempel- en luifelconstructies

Momenteel zijn de meeste nevengeulen in de Rijntakken voorzien van drempelconstructies die kunnen verschillen in vormgeving. Door deze constructies zal de morfologische ontwikkeling van de nevengeul hoofdzakelijk worden vertraagd, doordat de nevengeul minder vaak mee stroomt. Daarnaast heeft de hoogte

en de eventuele helling van de drempel, gecombineerd met de tegenwerkende kracht als gevolg van de zwaartekracht, een invloed op de transporteerbaarheid van sediment over de drempel. Opgemerkt moet worden dat in de praktijk ook sedimentatie kan plaatsvinden vóór de drempel, waardoor naar verloop van tijd een kleinere helling kan ontstaan, zie ook de Oost-Geul in figuur 7. Ook zal door een drempelconstructie minder afvoer naar de nevengeul worden geleid, waardoor de primaire waterstroming dicht bij de instroomopening (kribkop) van de nevengeul komt te liggen (paragraaf 3.4.1). Hierdoor zal er in principe minder sediment naar de nevengeul getransporteerd worden. Ook kunnen er bovenstrooms van een drempelconstructie verticale neren ontstaan, waarbij sediment over de drempelconstructie heen kan worden geleid. Deze bovenstaande processen zijn echter nog niet volledig beschreven, waardoor sedimenttransport over drempelconstructies nog onzeker blijft (Mosselman, 2001). Uit de praktijk blijkt dat de periodieke nevengeulen van Gameren, die voorzien zijn van drempelconstructies bij de instroomopening, toch een aanzienlijke sedimentatie optreedt (Jans, 2004). Wel moet er rekening gehouden worden met dat deze drempelconstructies gedeeltelijk in het verleden doorgebroken zijn.

Met luifelconstructies (figuur 38) wordt hoofdzakelijk, effectiever dan drempelconstructies, sedimentrijk water afgescheiden van sedimentarm water, waarbij vervolgens alleen het sedimentarm water aan het wateroppervlak naar de nevengeul doorgelaten wordt. Hierbij is het van belang dat deze constructies bovenstrooms van een nevengeul worden aangelegd. Een nadeel hierbij is dat deze constructies onderhoud vergen, omdat onder de scheidsplaat sedimentatie kan plaatsvinden. Deze sedimentatie kan zich uiteindelijk, bovenstrooms van de constructie, weer tot een dwarshelling vormen, waarbij de scheiding van sedimentarm en sedimentrijk water weer minder wordt. Dit onderhoud kan eventueel blijvend gereduceerd worden door een erosiegeul in combinatie met bodempanelen te plaatsen, waarbij zich een spiraalstroming kan ontwikkelen. Dit zal echter niet goed mogelijk zijn bij instroomopeningen van nevengeulen die binnen een kribvak liggen.



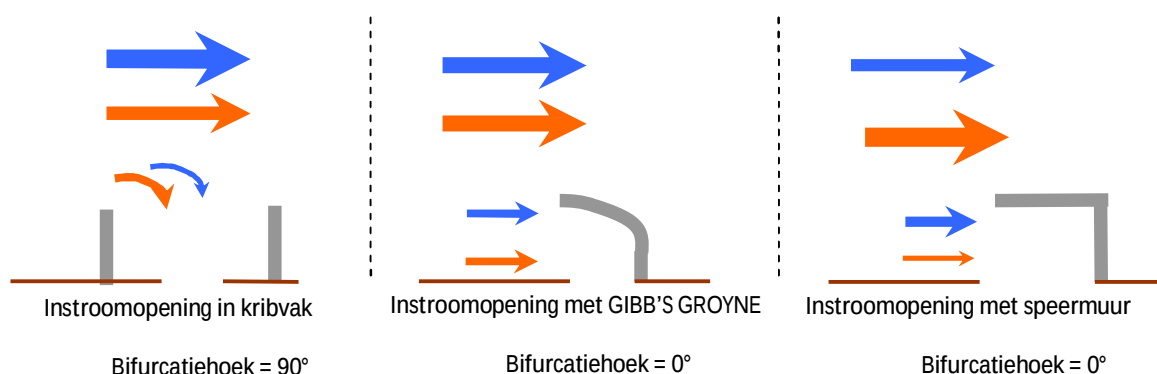
figuur 38: (links) een schematisatie van een luifelconstructie en (rechts) een schematisatie van een erosie geul met bodempanelen die een spiraalstroming kunnen ontwikkelen, uit Ghimire (2003).

8.2.2 Speermuur / GIBB'S GROUYNE

Zoals eerder beschreven in paragraaf 3.4.1 heeft de bifurcatiehoek van een (gelijkwaardige) aftakking een grote invloed op de afvoer- en sedimentverdeling op het splitsingspunt, zoals gebleken uit de laboratoriumstudies door Bulle in 1926 (de Heer, 2003). In hoeverre deze effecten ook optreden bij nevengeulen is nog niet goed bekend, uitgaande van de studies die in diepe stroomgoten met een kleine breedte - waterdiepte verhouding zijn gedaan (Ankum & Brouwer, 1993). De verwachting is dat deze effecten op de afvoer- en sedimentverdeling op het splitsingspunt met nevengeulen, vanwege een veel kleiner doorstroomprofiel, ook kleiner zullen zijn. Niettemin kan een iets grotere toename in het debiet, in vergelijking met de toename in de sedimentinstroom naar de nevengeul, als gevolg van de verandering van de bifurcatiehoek tot een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul leiden. Hierdoor zal er minder sedimentatie optreden. Tot op heden worden de instroomopeningen van nevengeulen nagenoeg met een rechte instroomhoek aangelegd tussen de stromingsrichting in de rivier rekening houdende met de inlaat van de nevengeul in een kribvak. Dit vanuit constructieve voordelen voor aansluitingen van drempelconstructies op de oeverwal, hetgeen resulteert in lagere aanlegkosten (Ankum & Brouwer, 1993). Door de bifurcatiehoek van de nevengeul kleiner te maken en door het kribvak aan te passen, kan het debiet naar de nevengeul toenemen. Dit heeft te maken met het feit dat het water vanuit de rivier minder sterk hoeft te worden afgebogen naar de nevengeul en waardoor eveneens de neervorming kleiner wordt. Een ingrijpende aanpassing van het kribvak wordt thans echter normaliter (nog) niet overwogen.

Door de kleinere kromming van het water neemt de dwarshelling in de waterspiegel ook af waardoor het Bulle effect, dat naar verwachting al klein zal zijn bij ongelijkwaardige nevengeulen, nog kleiner wordt. Hierdoor zal er nog minder sedimentrijk water van de hoofdgeul naar de nevengeul stromen, waardoor de toename in het debiet groter kan zijn dan de toename in de sedimentinstroom. Dit laatste is afhankelijk van 2D en 3D stromingspatronen en zal nader onderzocht moeten worden in een 3D model. De verwachting is dat deze verschillen niet al te groot zullen zijn, maar toch enige vergroting van de evenwichtsdiepte zullen brengen.

Wel moet bedacht worden dat in verband met behoud van de scheepvaartfunctie aanpassingen aan kribben maar in beperkte mate haalbaar zullen zijn. Onderstaand zijn twee principes weergegeven voor aanpassing van een kribvak, door middel van een GIBB'S GROUYNE en een speermuur, waarbij de vaarbreedte voor de scheepvaart in de rivier onveranderd blijft (figuur 39). De GIBB'S GROUYNE is een constructie die in het verleden veelal is toegepast bij de Indiase irrigatiepraktijk (Vashney, 1977; geciteerd in Ankum en Brouwer, 1993). Ervaring uit het verleden heeft geleerd dat een dergelijke constructie zorgt voor een proportionele sedimentverdeling op het splitsingspunt. Het voordeel van een speermuur is dat er zich geen neren vormen, waardoor de effectieve doorstroming naar de nevengeul groter is dan bij een GIBB's GROUYNE.



figuur 39: Schematisatie van kribconstructies waarin de afvoer- en sedimentverdeling tussen de hoofd en nevengeul kwalitatief is weergegeven. De totale afvoer en sedimenttransport in het watersysteem is telkens aan elkaar gelijk. Gezien vanuit links naar rechts neemt de afvoer naar de nevengeul steeds meer toe en het sedimenttransport alsmaar af.

8.2.3 Bodemschermen en drijvende schermen (bandalls)

Het achterliggende principe achter deze maatregelen is om secundaire stromingen op te wekken waarmee het bodemtransport weggeleid kan worden van de instroomopening van de nevengeul. Bodemschermen zijn verticale schermen die bovenstrooms van de nevengeul evenwijdig aan elkaar geplaatst worden en beginnend in de richting van de stromingsrichting en eindigen onder een bepaalde hoek (Ankum en Brouwer, 1993), zie ook figuur 40. Afhankelijk van de hoogte van deze schermen kan er lokaal een spiraalstroming worden opgewekt, waarmee het bodemtransport weggeleid kan worden. Als gevolg van deze spiraalstroming wordt sedimentarm water juist naar de nevengeul getransporteerd. De effectiviteit waarmee dit daadwerkelijk gebeurt is dus afhankelijk van het waterpeil en varieert dus ook bij verschillende waterdiepten. Ze functioneren daarom eigenlijk ook alleen optimaal bij een waterpeil dat vrijwel constant is (Ankum & Brouwer, 1993). Dit in tegenstelling tot de Nederlandse rivieren waarbij de waterdiepte variabel is.

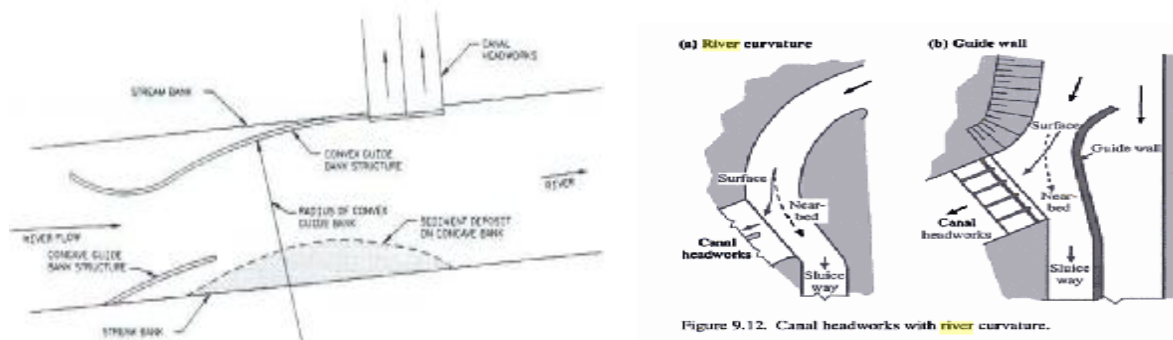
Drijvende schermen werken vergelijkbaar als bodemschermen. Door drijvende schermen wordt de stroming aan het wateroppervlak zo beïnvloedt, dat deze naar de nevengeul wordt geleid. Als een tegenbeweging ontstaat er ook een stroming op de bodem, die juist van de nevengeul wordt weggeleid. Hierdoor ontstaat uiteindelijk ook een spiraalstroming, waarmee het bodemtransport van de nevengeul wordt weggeleid. Een variant van drijvende schermen staan ook wel bekend als 'bandalls'. Dit zijn (beweegbare)schermen op palen waarmee de stroming aan het wateroppervlak beïnvloed kan worden (figuur 40). Afhankelijk onder welke hoek deze schermen geplaatst worden, kan juist de stroming aan het wateroppervlak (sedimentarm water) naar de nevengeul geleid worden. Als gevolg van een doorlaatopening aan de onderzijde van het scherm, wordt de stroming op de bodem juist van de nevengeul weggeleid. Afhankelijk van in hoeverre deze doorlaatopening aan de onderzijde wordt vernauwd (beweegbare scherm) kunnen stroomsnelheden op de bodem verhoogd worden, waardoor ook erosie kan ontstaan. Deze 'bandalls' constructies worden in het buitenland vaak gebruikt om erosie van zandbanken te realiseren (zie dwarsprofiel regulerende maatregelen).



figuur 40: (links) een schematisatie van bodem- en drijvende schermen waarmee sedimentrijk water op de bodem van een aftakking (nevengeul) weg kan worden geleid door middel van spiraalstroming. (rechts) een schematisatie van een 'bandall' constructie waarmee ook sedimentarm water naar de nevengeul en sedimentrijk water naar de hoofdgeul kan worden geleid, wanneer deze bij de instroomopening van de nevengeul (kribvak) worden geplaatst.

8.2.4 Stroomgeleidende wanden

Met stroomgeleidende wanden (figuur 41) kan kunstmatig spiraalstroming worden opgewekt, waardoor het bodemtransport hoofdzakelijk via de kunstmatige binnenbocht plaatsvindt (zoals eerder beschreven bij de sedimentaanbod processen in paragraaf 3.4.1). Echter in de grote Nederlandse rivieren speelt de scheepvaart een belangrijke rol, waardoor deze constructies beperkt en maar kleinschalig toepasbaar zijn. In nader onderzoek kan onderzocht worden of deze maatregelen op kleine schaal voldoende spiraalstroming kunnen opwekken en voldoende reductie kunnen leveren in de sedimentinstroom naar de nevengeul.



figuur 41: een schematisatie van stroomgeleidende wanden waarmee kunstmatig een spiraalstroming gegenereerd kan worden bij de instroomopening van een nevengeul om bodemtransport naar de nevengeul te reduceren.

8.3 Debietregulerende maatregelen

Debietregulerende of 'flush' maatregelen worden in dit onderzoek in principe beschouwd als tijdelijke of permanente maatregelen, waarmee het debiet naar de nevengeul kan worden vergroot, bij een zekere afvoer door de rivier. Hiermee kan de stroomsnelheid in de nevengeul worden vergroot zonder het dwarsprofiel van de nevengeul te verkleinen. Maatregelen die hierbij ontwikkeld zijn:

- waterpeilverhoging op het splitsingspunt (paragraaf 8.3.1)
 - § beweegbare bodemdrempel
 - § dwarsprofielversmalling in hoofdgeul door schanskorven
- lokale waterpeilverhoging bij instroomopening nevengeul door middel van langsdam (paragraaf 8.3.2)
- toepassing van baggerschuitpompen (paragraaf 8.3.3)

Bij het toepassen van deze maatregelen dient er met onderstaande punten rekening worden gehouden:

- er dient rekening te gehouden worden met terugstroming van water doordat 'flush' maatregelen in de nevengeul tot een verhoogd waterpeil leiden. Hierdoor kan het water bovenstrooms weer terugstromen naar de hoofdgeul als gevolg van een lager waterpeil;
- een groter debiet naar de nevengeul dat resulteert in een hogere stroomsnelheid kan naast een toename in de sedimentuitstroom tegelijkertijd ook zorgen voor een toename in de

sedimentinstroom, zie ook figuur 37. Alleen wanneer de toename in het debiet groter is dan toename in het sedimetaanbod kan erosie gerealiseerd worden in de nevengeul;

- er kan (sterke) sedimentatie in de hoofdgeul ontstaan wanneer er in verhouding, ten opzichte van een zekere sedimentverdeling, teveel debiet naar de nevengeul wordt getransporteerd. Enerzijds kunnen deze maatregelen slechts tijdelijk worden toegepast in trajecten waarbij de vaardiepte in de hoofdgeul gering is. Anderzijds kan het een middel zijn om autonome bodemdaling in de rivier te verminderen;
- de beweegbare bodemdrempel en de dwarsprofielversmalling (schanskorven) kunnen constructief een beperking hebben in de toepassing. Dit in verband met de benodigde vaardiepte en vaarbreedte voor de scheepvaart in de hoofdgeul.

8.3.1 Waterpeilverhoging door schanskorven of bodemdrempels

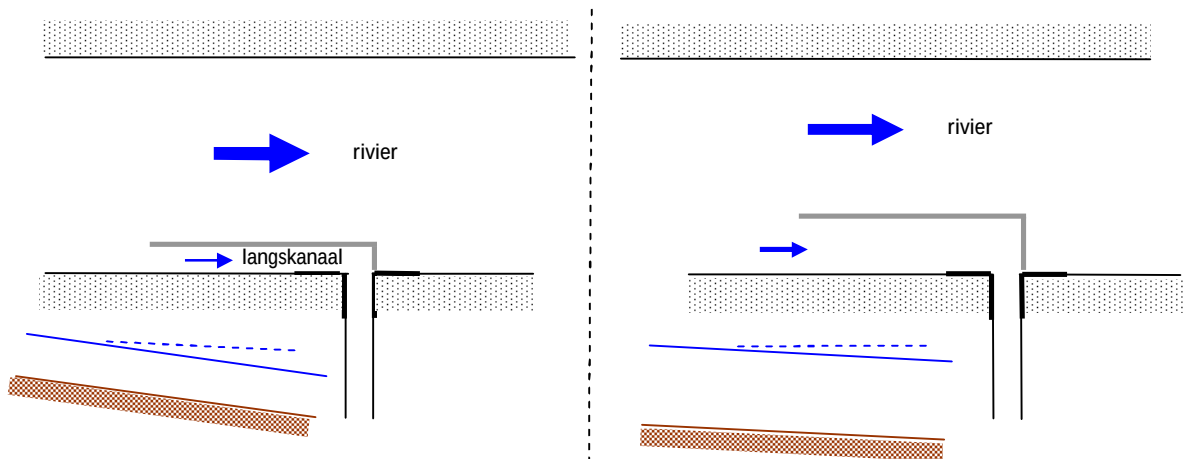
Een manier om het debiet naar een nevengeul te verhogen is om (tijdelijk) het waterpeil op het splitsingspunt te verhogen. Dit kan in eerste instantie gedaan worden door de kribben, benedenstrooms van de instroomopening van de nevengeul, (tijdelijk) te verlengen met behulp van schanskorven. Schanskorven zijn stalen constructies die naderhand gevuld kunnen worden met stenen brokken of enig ander materiaal (Chaychuck, 2005). Een andere manier waarmee het waterpeil op het splitsingspunt verhoogd kan worden is door benedenstrooms van een splitsingspunt een bodemdrempel te plaatsen die in hoogte kan variëren. Als gevolg van een hoger waterpeil zal de nevengeul meer debiet onttrekken. Het terugstromen van water van de nevengeul naar de rivier wordt met deze maatregelen voorkomen, doordat het waterpeil van de rivier mede wordt verhoogd. Het totale sedimenttransport, dat van bovenstrooms naar het splitsingspunt wordt getransporteerd, zal iets afnemen doordat de stroomsnelheid bovenstrooms van het splitsingspunt iets afneemt als gevolg van een hoger waterpeil. De hoeveelheid sedimenttransport wordt nog lager wanneer het waterpeil alleen wordt opgestuwd tijdens relatieve lage afvoeren van de rivier.

Doordat de nevengeul meer debiet onttrekt, zal de nevengeul in principe ook meer sediment onttrekken. Er zal alleen een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul ontstaan wanneer het debiet naar de nevengeul in verhouding meer toeneemt dan de toename in het sedimenttransport. Of dit ook daadwerkelijk gebeurt bij het verhogen van het waterpeil op het splitsingspunt met bovenstaande maatregelen, zonder toepassing van aanvullende maatregelen, kan niet goed bepaald worden. Hiervoor is meer inzicht nodig in hoe het sediment zich daadwerkelijk verdeelt op het splitsingspunt onder deze omstandigheden. Doordat het Bulle Effect een steeds een grotere rol gaat spelen, wanneer de nevengeul meer debiet onttrekt, is de verwachting dat de evenwichtsdiepte in de nevengeul niet veel groter of misschien juist wel kleiner zal worden. Naast de onzekerheid in de sedimentverdeling dient ook opgemerkt te worden dat bovenstaande maatregelen maar beperkt toepasbaar zijn in rivieren waarbij scheepvaart een belangrijke rol speelt. Dit in verband met de benodigde vaardiepte en vaarbreedte.

8.3.2 Langsdam en lokale waterpeilverhoging bij de instroomopening van een nevengeul

Een andere mogelijke oplossing om het debiet naar de nevengeul te vergroten door waterpeilverhoging, is door bovenstrooms van de instroomopening een aantal kribvakken door te steken en ter hoogte van de kribkoppen een strekdam ofwel langsdam aan te leggen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 42. De langsdam zorgt er mede voor dat de kromming van het water naar de nevengeul kleiner wordt, waardoor naar verwachting het Bulle Effect minder effect zal hebben op de sedimentverdeling, wanneer de nevengeul meer debiet onttrekt. Dit in tegenstelling tot de maatregelen zoals met schanskorven en bodemdrempels.

In rivieren met een steil bodemverhang kan een verlaagd bodemverhang in de langsggeul voor een verhoogd waterpeil zorgen bij de instroomopening van een nevengeul. Hierbij voorkomt de langsdam dat er weer water naar de rivier stroomt als gevolg van een lager waterpeil. Doordat het bodempeil van de Nederlandse rivieren relatief laag is, is het verval ook al relatief laag. Om deze reden is een lager verhang in de langsggeul in de langsdam moeilijk realiseerbaar.



figuur 42: Hier is een schematisatie van twee langskribben weergegeven bovenstrooms van de instroomopening van een nevengeul. (links) is een situatie geschematiseerd van een rivier met een steil bodemverhang waarbij het bodemverhang binnen de langskrib veel lager is. Dit zorgt ervoor dat het waterpeil bij de instroomopening van de nevengeul verhoogd kan worden. (rechts) is een schematisatie van een rivier weergegeven, waarbij de rivier een flauw bodemverhang heeft. Hierbij kan een waterpeilverhoging gerealiseerd worden door de energieverliezen te verlagen (plaatshoogte + drukhoogte + snelheidshoogte). Dit kan gedaan worden door het doorstroomprofiel in de langsgeul 'gladder' en groter te maken waardoor de stroomsnelheid in de langsgeul lager wordt. Doordat de kinetische energie (snelheidshoogte) afneemt moet de drukhoogte wel toenemen, waardoor er een waterpeilverhoging kan ontstaan. Als vervolg van een hoger waterpeil zal de nevengeul meer debiet onttrekken, waardoor de stroomsnelheid in de langsgeul weer zal toenemen. Om deze reden is het belangrijk dat het doorstroomprofiel in de langsgeul groot genoeg wordt gemaakt zodat de stroomsnelheden nagenoeg laag blijven.

Om bij de instroomopening van een nevengeul toch een waterpeilverhoging te krijgen, moeten de energieverliezen gereduceerd worden (totale energie = plaatshoogte + drukhoogte + snelheidshoogte). Dit kan gedaan worden door de stroomsnelheid in de langsgeul te reduceren middel door het doorstroomprofiel van de langsgeul zowel groter en gladder te maken. In de rivier is nog circa 25 meter beschikbaar tussen de kribkop en de vaargeul, waardoor een groter doorstroomprofiel in de langsgeul realiseerbaar is. Doordat de kribvakken worden doorgestoken of geheel verwijderd worden kan de (stromings)weerstand in het doorstroomprofiel eveneens worden verlaagd. Hierdoor zal het debiet naar de langsgeul toenemen, waarbij de stroomsnelheid nagenoeg laag blijft. Als gevolg van de reductie in het energieverlies leidt dit tot een waterpeilverhoging bij de instroomopening van de nevengeul. De langsdam zelf voorkomt dat water van de langsgeul (hoger waterpeil) weer terugstroomt naar de hoofdgeul (lager waterpeil). Doordat de langsdam zelf en de oever van de rivier toch ruwer zijn dan de hoofdstroom van de langsgeul zelf, kunnen hier eventueel ook natuurvriendelijke oevers van gemaakt worden. Wel blijft dit natuurlijk in beperkte mate mogelijk, doordat de langsgeul niet te veel stromingsweerstand ondervindt.

Om de waterpeilverhoging van de langsdam inzichtelijk te maken volgt hieronder twee rekenvoorbeelden, waarbij een langsgeul(dam) in de Waal (natuurvriendelijke oever) van 2 kilometer wordt aangelegd. Bij deze rekenvoorbeelden wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee situaties: A) situatie waarbij geen wrijvingsverliezen aanwezig zijn B) situatie waarbij de wrijvingsverliezen worden gereduceerd door een lage stroomsnelheid in de langsgeul.

Rekenvoorbeeld A

Het gemiddelde bodemverhang van de Waal ligt ongeveer op 0,0001. Dit betekent in het meest optimale geval, indien geen energieverliezen aanwezig zijn, dat het waterpeil bovenstrooms van de instroomopening van de nevengeul met 0,2 meter verhoogd kan worden. In werkelijkheid zullen er altijd verliezen optreden, waardoor deze optimale situatie nooit bereikt zal worden.

Rekenvoorbeeld B

In het ontwerp, zoals gedefinieerd in paragraaf 7.2, onttrekt de nevengeul bij een geulvullende afvoer van 2.000 m³/s door de Waal, met een bijhorend waterpeil van 2,6 m+NAP op het splitsingspunt, een afvoer van 25 m³/s (tabel 6). De kribben die in de Waal worden aangelegd hebben ongeveer een lengte van 100 meter

(Ruimte voor de rivier, 2009). Wanneer de kop van een krib gelegen is op 0 m+NAP bevindt er zich een waterdiepte van 2,6 m in het kribvak. Dit geeft globaal een stroomvoerend oppervlak van 130 m² waarbij een stroomsnelheid ontstaat van 0,2 m/s gerelateerd aan een onttrekking van 25 m³/s door de nevengeul. Aan de hand van een Chezy vergelijking, zoals weergegeven in vergelijking (41), kan het nieuwe waterverhang in het kribvak worden berekend.

$$i_b = \frac{u^2}{C^2 \cdot h} \quad (41)$$

Stel dat de stromingsweerstand (C_2) van de natuurvriendelijke oever gelijk is aan 20 [m^{1/2}/s], de stroomsnelheid (u) gelijk is aan 0,2 [m/s] en de waterdiepte (h) gelijk is aan 2,6 [m] dan resulteren deze waarden in een bodem- en waterverhang van ongeveer 0,00004. Dit nieuwe waterverhang geeft een verlies van 0,08 meter over een afstand van 2.000 meter ten opzichte van de optimale situatie. Hierdoor ontstaat er nu nog maar een waterpeilverhoging van 0,12 meter. Als gevolg deze waterpeilverhoging, ontstaat er een groter verval, waardoor de nevengeul meer debiet gaat onttrekken. Dit levert weer een verhoging van de stroomsnelheid op in de langskrib, waardoor er weer meer energieverliezen kunnen ontstaan. Het is daarom van belang dat het doorstroomprofiel in de langseul groot genoeg wordt gemaakt, waardoor de stroomsnelheden zowel na een grotere debietonttrekking van de nevengeul nagenoeg laag blijven.

In combinatie met een natuurvriendelijke oever dient er rekening gehouden te worden met het feit dat er onderhoud gepleegd moet worden. Behalve dat de langskrib volledig kan dicht groeien als gevolg verdere vegetatieontwikkeling, vindt er natuurlijk ook sedimentatie plaats als gevolg van de lagere stroomsnelheid.

8.3.3 (Baggerschuit)pompen

De achterliggende gedachte bij het gebruik van (baggerschuit)pompen is om sedimentarm water te onttrekken, aan het wateroppervlak van de hoofdgeul, en vervolgens te verpompen naar de nevengeul. Met deze methode kan er met het debiet geen tot weinig sediment naar de nevengeul worden getransporteerd. Hierbij kan zelfs al bij relatieve lage debietcapaciteiten erosie in de nevengeul gerealiseerd worden. Dit kunnen dus debietcapaciteiten zijn die ook onder normale omstandigheden naar de nevengeul worden getransporteerd en gerelateerd zijn aan een minimaal mogelijke verstoring van de nevengeul. Daarnaast is het de bedoeling om deze pompen op een baggerschuit te plaatsen, waardoor deze maatregel (flexibel) verplaatst kan worden en dus ingezet kan worden bij meerdere sedimenterende nevengeulen. Daardoor hoeft de maatregel niet grootschalig in de nevengeul geplaatst te worden, waardoor eveneens de verstoring in de nevengeul beperkt zal blijven.

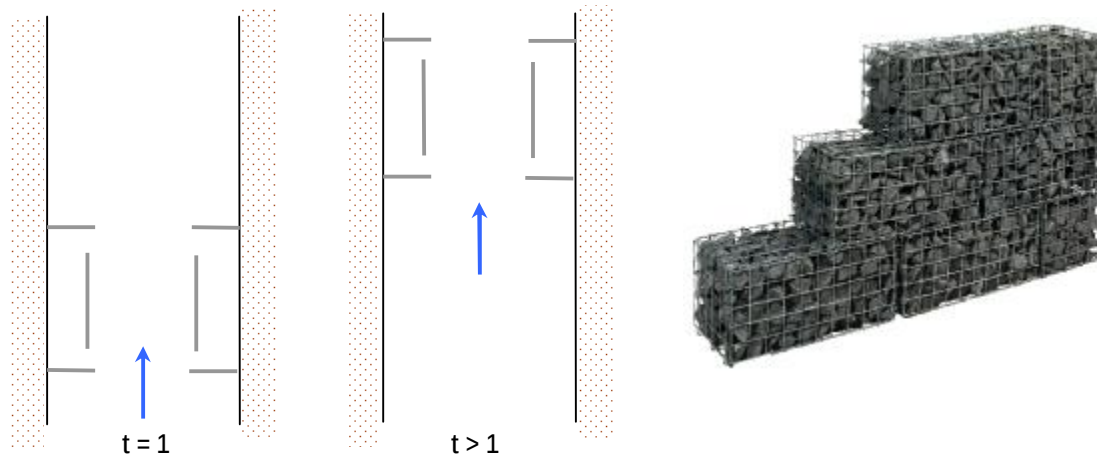
Om terugstroming van water van de nevengeul naar de hoofdgeul als gevolg van een lager waterpeil te voorkomen, moet daarbij wel de nevengeul bovenstrooms afgesloten worden met een constructie. Aangezien nevengeulen een relatief smalle profielbreedte hebben, hoeft dit niet direct een probleem op te leveren. Wel neemt de profielbreedte van de nevengeul toe, naarmate de nevengeul verder sedimenteert. Bij een toenemende profielbreedte is er steeds een groter debiet nodig om de aanvangstroomsnelheid, waarbij sedimenttransport plaatsvindt, te overschrijden. In de praktijk gaat het bij een zandige bodem hierbij om stroomsnelheden groter dan circa 0,3 m/s. Om de maatregel dus effectief in te zetten, zonder de debietcapaciteiten ver boven normale omstandigheden te vergroten, moet deze maatregel vroegtijdig worden ingezet bij sedimenterende nevengeulen. Doordat het debiet kunstmatig naar de nevengeul wordt gereguleerd, is de toepasbaarheid van deze maatregel niet afhankelijk van de afvoercondities in het riviersysteem.

Doordat het effect van deze maatregel sterk afhankelijk is van de reductie in de sedimentinstroom, kan deze maatregel ook gezien worden als een sedimentreducerende maatregel. Doordat echter met deze maatregel (fysiek) water wordt verpompt, is deze maatregel toch onder debietregulerende maatregelen beschreven.

8.4 Dwarsprofielregulerende maatregelen

Dwarsprofiel regulerende maatregelen zijn maatregelen die het dwarsprofiel van de nevengeul verkleinen, waardoor de stroomsnelheid en dus de sedimenttransportcapaciteit van sediment in de nevengeul (uitstroom sediment) toeneemt. Zo kunnen schanskorven of caissons het dwarsprofiel van de nevengeul tijdelijk lokaal

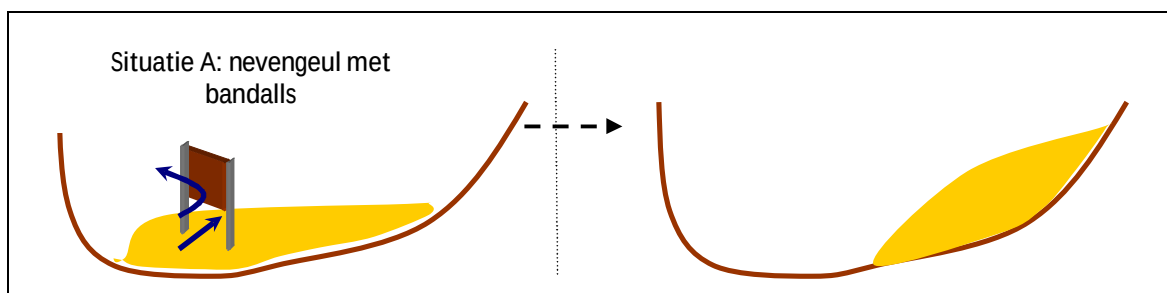
versmallen. Schanskorven zijn roosterconstructies, die naderhand gevuld kunnen worden met puinbrokken of enig ander materiaal waarmee het gewicht van de constructie kan worden verhoogd (figuur 43). Caissons zijn vergelijkbare constructies waarbij (opvul)bakken gevuld kunnen worden met water. Om zo min mogelijk schanskorven of caissons te gebruiken zal men in de praktijk het dwarsprofiel van de nevengeul, door middel van deze constructies, als volgt kunnen verkleinen die in de tijd kunnen worden verplaatst (figuur 43).



figuur 43: (links) een schematisatie van hoe met een dwarsprofiel regulerende maatregel het dwarsprofiel in een nevengeul verkleind kan worden (rechts). Een foto van een schanskorfconstructie waarmee het dwarsprofiel in de nevengeul verkleind kan worden (links).

Wanneer het debiet naar de nevengeul min of meer gelijk blijft, kan hiermee de stroomsnelheid en dus ook de transportcapaciteit van sediment in de nevengeul lokaal worden verhoogd. Zoals eerder aangegeven in paragraaf 8.1 is er een verwachting dat het debiet naar de nevengeul zal afnemen als gevolg van een grotere stromingsweerstand door de lokale dwarsprofielverkleining. Hierdoor kan er in de nevengeul, waar de dwarsprofielverkleining niet is toegepast, weer extra sedimentatie ontstaan als gevolg van een lagere stroomsnelheid. Om te analyseren in hoeverre deze verschijnselen zich daadwerkelijk voordoen, is deze maatregel ook in SOBEK gesimuleerd in paragraaf 9.4.

Een andere maatregel die gebruikt kan worden zijn ‘bandalls’ waarmee ook het dwarsprofiel van de nevengeul min of meer verkleind kan worden. Deze maatregel is al eerder beschreven in paragraaf 8.2.3. Hierbij zijn ‘bandalls’ beschreven als constructies die geplaatst kunnen worden bij de instroomopening van een nevengeul (kribkop) om de sedimentinstroom naar de nevengeul te reduceren. Deze maatregelen kunnen echter ook voor herprofilering zorgen wanneer deze constructies in de nevengeul (op een zandbank) worden geplaatst. Door deze constructies wordt het water aan het oppervlak afgebogen naar de hoofdstroom in de nevengeul. Doordat de instroomopening aan de onderzijde van het scherm wordt vernauwd kan op de bodem van de zandbank erosie ontstaan. Grotendeels zal dit sediment weer hoger op de oever in de nevengeul worden afgezet (figuur 44). Een kleiner deel zal ook deels uit de nevengeul worden getransporteerd. Als gevolg van de herprofilering ontstaat er weer een diepere sneller stromende hoofdstroom in de nevengeul, waarmee de afvoercapaciteit kan worden verhoogd. De totale afvoercapaciteit is wel nog steeds afgenomen, doordat er nog steeds sedimentatie heeft plaatsgevonden. De effecten van ‘bandalls’ worden sterk bepaald door 3D stromingspatronen en kunnen dus niet bepaald worden in een 1D model.



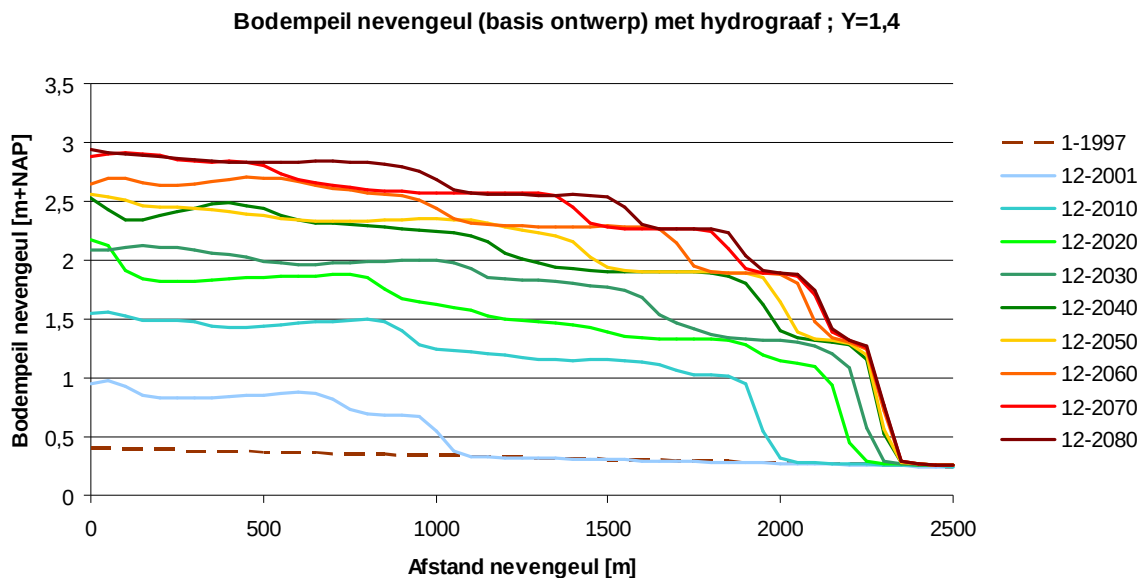
figuur 44: een schematisatie waarbij bandalls in een nevengeul worden geplaatst en voor herprofilering zorgen

9 Sedimentbeheersende maatregelen en hun effecten

In dit hoofdstuk worden de effecten van de sedimentbeheersende maatregelen op de morfologische ontwikkeling van de nevengeul, zoals weergegeven in figuur 45, geanalyseerd. Vanwege modelmatige beperkingen in het SOBEK-RE model kunnen niet altijd de maatregelen direct gemodelleerd worden. In deze gevallen wordt in plaats van de maatregel het eventuele effect van deze maatregel gesimuleerd. Vervolgens wordt kwalitatief geanalyseerd in hoeverre deze effecten bereikt kunnen worden met maatregelen en in hoeverre deze ook haalbaar zijn rekeninghoudende met de scheepvaart. De effecten van sedimentbeheersende maatregelen zijn bepaald aan de hand van een hydrograaf met een periode van 8 jaar, zie ook figuur 46. Maatregelen die tijdelijk worden ingezet, die dus worden ingezet nadat enige sedimentatie heeft plaatsgevonden in de nevengeul (figuur 45), zijn gemodelleerd in combinatie met 'restart files'. Met deze 'restart-files' kan de morfologische ontwikkeling (bodempelig) van de nevengeul op een zeker moment gekopieerd worden naar een nieuwe simulatie, waarbij een maatregel wordt toegepast.

9.1 Casestudie: toepassing van de sedimentbeheersende maatregelen

Voordat de effecten van de maatregelen geëvalueerd en toegepast kunnen worden, moet er eerst een casestudie gedefinieerd worden, waarin de nevengeul zich morfologisch heeft ontwikkeld. In figuur 45 is de morfologische ontwikkeling van de SOBEK nevengeul (zie basisontwerp in paragraaf 7.2) weergegeven met een hydrograaf van circa 80 jaar (zie figuur 23), waarbij parameter 'Y' gelijk is aan 1,4. Met deze waarde voor parameter 'Y' is het gemiddelde bodempelig van de nevengeul (basis ontwerp) globaal gestegen met 0,4 meter binnen een periode van 5 jaar. Deze morfologische ontwikkeling komt globaal overeen met de sedimentatiesnelheid van 0,08 meter per jaar in de nevengeulen van Gameren (Jans, 2004) en ondervindt dus een realistische sedimentatiesnelheid. In figuur 45 is ook de verdere morfologische ontwikkeling van de nevengeul weergegeven, waarbij het bovenstrooms bodempelig na een periode van circa 80 jaar gelijk is aan 3,0 m+NAP. In relatie met het interventiemoment moet er worden ingegrepen in de ontwikkeling van de SOBEK nevengeul, wanneer bovenstrooms een bodempelig van 1,0- 1,5 m+NAP wordt bereikt (zie paragraaf 7.3). Deze kritische bodempeligen worden globaal in 2002 en 2011 bereikt (figuur 45).



figuur 45: De morfologische ontwikkeling van de nevengeul (basisontwerp) bij Y = 1,4

9.2 Sedimentreducerende maatregelen en hun effecten

Sedimentreducerende maatregelen zijn constructies, die bovenstrooms toegepast kunnen worden bij sedimenterende nevengeulen. Verder kunnen sedimentreducerende maatregelen zowel tijdelijk (na enige morfologische ontwikkeling in de nevengeul) als permanent (direct bij aanleg van de nevengeul) worden ingezet. In paragraaf 8.2 zijn i) drempel- en luifelconstructies, ii) speermuur / GIBB's GROUYNE en iii) 'bandalls', bodem- en drijvende schermen als potentieel haalbare maatregelen naar voren gekomen, waarmee het sediment bovenstrooms naar de nevengeul gereduceerd kan worden.

9.2.1 Algemene principes sedimentreducerende maatregelen

In eerste instantie kunnen sedimentreducerende maatregelen de morfologische ontwikkeling van een nevengeul vertragen door de sedimentinstroom naar de nevengeul te verkleinen. Afhankelijk van hoe sterk het sedimentaanbod naar de nevengeul wordt gereduceerd en op welk moment sedimentreducerende maatregelen worden ingezet, kunnen deze maatregelen ook tot erosie leiden wanneer er aan de twee volgende randvoorwaarden wordt voldaan. Ten eerste moet de stroomsnelheid in de nevengeul groter zijn dan de aanvangstroomsnelheid in relatie met de 'kritieke Shieldsparameter'. Alleen bij deze hogere stroomsnelheden kan een nevengeul sediment transporteren. Ten tweede moet de instroom van het sediment naar de nevengeul kleiner zijn dan de uitstroom van het sediment.

9.2.2 Modelmatige aanpak

In werkelijkheid worden de effecten van sedimentreducerende maatregelen (constructies), het reduceren van de instroom van sediment via bodemtransport naar een nevengeul, bepaald door lokale 2D en 3D stromingspatronen rondom de constructie. Echter deze stromingspatronen kunnen niet in een 1D model worden meegenomen, waardoor deze constructies niet direct gesimuleerd kunnen worden in het SOBEK-RE model. Wel kan in het SOBEK-RE model een zekere geschatte reductie in de sedimentinstroom naar de nevengeul met de bijhorende effect op de morfologische ontwikkeling gesimuleerd worden. Wanneer hierin meer inzicht is verkregen, kan achteraf kwalitatief beoordeeld worden in hoeverre met sedimentreducerende maatregelen de morfologische ontwikkeling van nevengeulen beïnvloed kan worden.

Reductie van de sedimentinstroom naar een nevengeul kan gesimuleerd worden door de parameter 'Y' tijdelijk te verhogen, waardoor de instroom van het sediment naar de nevengeul gereduceerd wordt. Hierbij is de reductie van de sedimentinstroom naar de nevengeul niet constant over de simulatieperiode en is verder afhankelijk van de afvoerverdeling tussen de hoofd- en nevengeul. Om toch meer inzicht te krijgen in het reducerende effect van de sedimentinstroom is in tabel 9 de procentuele verandering van de sedimentinstroom naar de nevengeul weergegeven bij een constante geulvullende afvoer van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, waarbij globaal $0,043 \text{ m}^3/\text{s}$ sediment door de moedergeul wordt getransporteerd. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt in de afvoerverdeling tussen de initiële situatie (direct na aanleg) en een situatie waarbij 1,1 meter aanzanding is opgetreden in de nevengeul. In de initiële situatie is de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) gelijk aan 79 waarbij $25 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de nevengeul en $1975 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de hoofdgeul wordt getransporteerd. In de andere situatie is de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) gelijk aan 142 waarbij $14 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de nevengeul en $1986 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de hoofdgeul wordt getransporteerd. De procentuele verandering van de sedimentinstroom in relatie met de verandering van parameter 'Y', is telkens weergegeven ten opzichte van de oorspronkelijke situatie, waarbij parameter 'Y' gelijk is aan 1,4.

Uit tabel 9 is duidelijk af te leiden dat de grootste reductie in sedimentstroom naar de nevengeul optreedt bij relatieve lage Y-waarden (om en nabij de kritieke waarde van parameter 'Y'). Dit verschijnsel is terug te zien in de verandering van de evenwichtsdiepte van de nevengeul in figuur 11 in paragraaf 5.3. Hierbij treedt de grootste verandering op in de evenwichtsdiepte bij nog relatieve lage Y-waarden. Ook is uit tabel 9 af te leiden dat verschillen in de afvoerverdeling niet een al te grote spreiding oplevert in de reductie van de sedimentinstroom, bij een zekere waarde voor parameter 'Y', naar de nevengeul. Wanneer parameter 'Y' groter is dan 5 is de sedimentinstroom naar de nevengeul bijna volledig met 100 procent gereduceerd. (ten opzichte sedimentinstroom bij $Y = 1,4$)

tabel 9: Procentuele reductie van de sedimentinstroom (ten opzichte sedimentinstroom bij $Y = 1,4$) naar de nevengeul bij twee constante afvoerverdelingen op het splitsingspunt.

Y	Geulvullende afvoerverdeling direct na aanleg met $Q_1 = 1975 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_2 = 25 \text{ m}^3/\text{s}$		Geulvullende afvoerverdeling na 1,1 meter sedimentatie met $Q_1 = 1986 \text{ m}^3/\text{s}$ en $Q_2 = 14 \text{ m}^3/\text{s}$	
	Q_{s2in} [m^3/s]	Procentuele reductie van Q_{s2in} ten opzichte van $Y = 1,4$ [%]	Q_{s2in} [m^3/s]	Procentuele reductie van Q_{s2in} ten opzichte van $Y = 1,4$ [%]
1,40	2,95E-04	0,0	1,30E-04	0
1,45	2,66E-04	-9,8	1,14E-04	-12
1,50	2,40E-04	-18,6	1,00E-04	-23
1,55	2,16E-04	-26,6	8,76E-05	-33
1,60	1,95E-04	-33,8	7,67E-05	-41
1,65	1,76E-04	-40,3	6,72E-05	-48
1,70	1,59E-04	-46,1	5,88E-05	-55
1,75	1,43E-04	-51,4	5,15E-05	-60
1,80	1,29E-04	-56,2	4,51E-05	-65
1,85	1,16E-04	-60,5	3,95E-05	-70
1,90	1,05E-04	-64,4	3,46E-05	-73
1,95	9,47E-05	-67,9	3,03E-05	-77
2,00	8,54E-05	-71,0	2,65E-05	-80
3	1,08E-05	-96,4	1,86E-06	-98,6
4	1,35E-06	-99,5	1,30E-07	-99,9
5	1,70E-07	-99,9	9,11E-09	-100,0
6	2,14E-08	-100,0	6,38E-10	-100,0
7	2,69E-09	-100,0	4,47E-11	-100,0
8	3,38E-10	-100,0	3,13E-12	-100,0
9	4,25E-11	-100,0	2,19E-13	-100,0
10	5,35E-12	-100,0	1,53E-14	-100,0

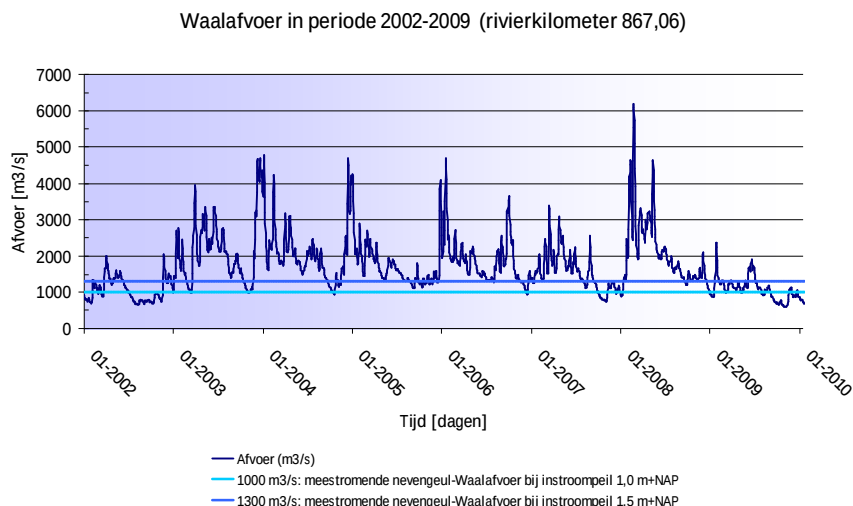
9.2.3 Effecten sedimentreducerende maatregelen die na aanleg permanent worden ingezet

De effecten van sedimentreducerende maatregelen die direct na aanleg van de nevengeul permanent worden ingezet, staan in feite al weergegeven in figuur 34 en in figuur 36. In deze situaties wordt de sedimentinstroom naar de nevengeul permanent kleiner, waardoor continu een grotere evenwichtsdiepte wordt bereikt in de nevengeul. Bij een grotere evenwichtsdiepte hoort een lagere evenwichtsbodempeil, waardoor er minder sedimentatie in de nevengeul optreedt. Uit figuur 35, in samenhang met tabel 9, kan geconcludeerd worden dat de sedimentinstroom naar een ongelijkwaardige sedimenterende nevengeul relatief sterk gereduceerd moet worden om erosie te verkrijgen voorbij de aanlegdiepte van 0,4 m+NAP. Dit geeft aan dat nevengeulen direct na aanleg meer de neiging hebben om te sedimenteren dan te eroderen. Dit betekent dat het effectief kan zijn om sedimentreducerende maatregelen permanent en vanaf het begin in te zetten om de morfologische ontwikkeling van deze nevengeulen te vertragen. In figuur 45 is te zien dat een ongelijkwaardige nevengeul ($Y = 1,4$), het bodempeil van 1,0 m+NAP bereikt na globaal een periode van 5 jaar (jaar 2002). Echter wanneer de sedimentinstroom globaal met 40 á 60 procent wordt gereduceerd ($Y = 1,6$ en $Y = 1,8$) wordt het bovenstroomse bodempeil van 1,0 m+NAP pas in jaar 2006/2021 bereikt. In deze situaties wordt de ontwikkeling dus met 4 á 19 jaar vertraagd. Wanneer de sedimentinstroom met 80 procent wordt gereduceerd ($Y = 2$), ongeacht de haalbaarheid, wordt het bovenstroomse bodempeil van 1,0 m+NAP in een periode van circa 80 jaar nog steeds niet bereikt. Hierbij treedt dus een vertraging op van 78 jaar. Hieruit kan geconcludeerd worden, indien de sedimentinstroom naar de nevengeul met permanente sedimentreducerende maatregelen sterk gereduceerd kan worden, deze maatregelen een mogelijkheid bieden om de morfologische ontwikkeling van sedimenterende nevengeulen te vertragen met 5 jaar (40 % reductie in sedimentinstroom) ofwel 80 jaar (80 % reductie in de sedimentinstroom).

9.2.4 Effecten tijdelijk inzetten van sedimentreducerende maatregelen

Sedimentreducerende maatregelen kunnen ook tijdelijk worden ingezet. In paragraaf 8.3 is aangegeven dat er wordt ingegrepen in de morfologische ontwikkeling van een nevengeul, wanneer globaal 10 procent van het doorstroom oppervlak bovenstrooms van de nevengeul dicht gesedimenteerd is. Dit zijn situaties waarbij het bovenstroomse bodempeil van de nevengeul (basisontwerp) globaal gelijk is aan 1,0 m+NAP en 1,5 m+NAP.

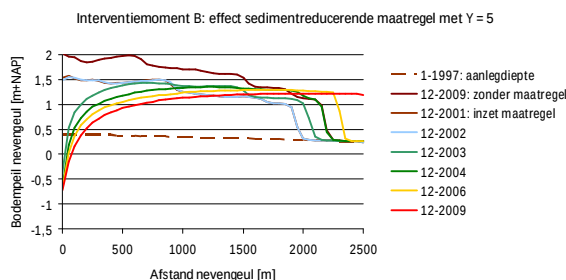
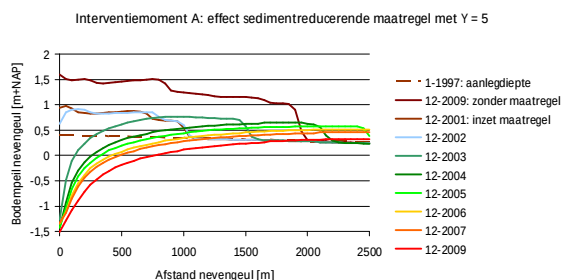
Deze bodempelen worden in figuur 45 globaal bereikt binnen een periode van 5 jaar (2002) á 14 jaar (2011), waarbij parameter 'Y' gelijk is aan 1,4. In figuur 46 is de hydrograaf van 8 jaar weergegeven, die gebruikt is bij het analyseren van de effecten van tijdelijke sedimentreducerende maatregelen. De nevengeul (basisontwerp) met een bovenstrooms bodempeil van 1,0 m+NAP is net watervoerend bij een Waalafvoer van 1.000 m³/s. Bij een bovenstrooms bodempeil van 1,5 m+NAP is de nevengeul net watervoerend bij een Waalafvoer van 1.300 m³/s.

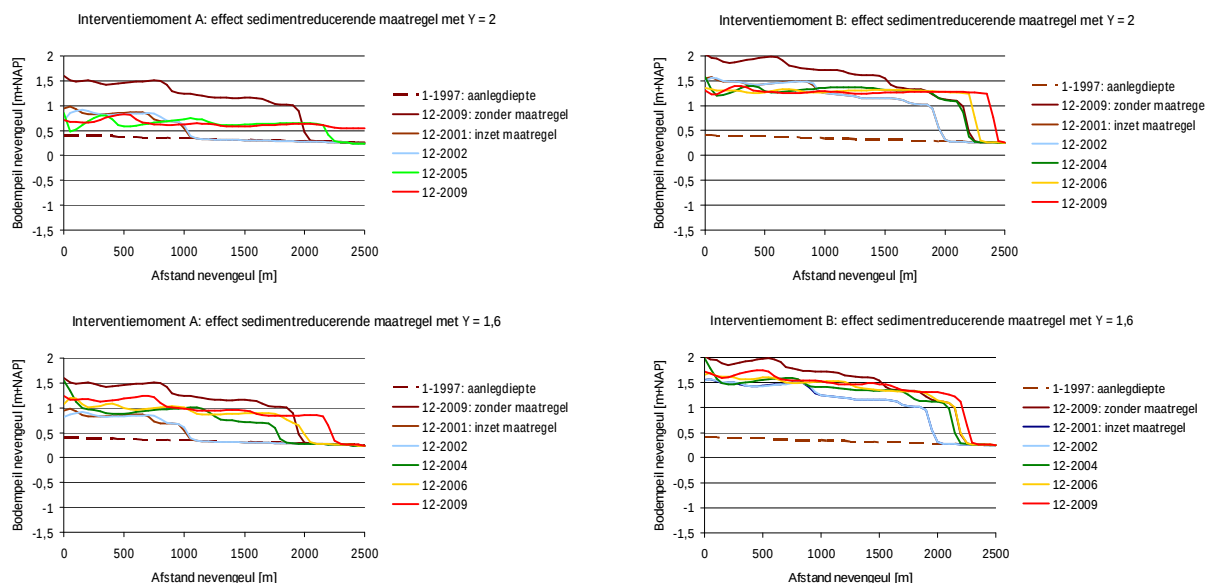


figuur 46: in deze figuur is een hydrograaf (8 jaar) weergegeven waarmee de effecten van tijdelijke sedimentreducerende maatregelen geanalyseerd zijn. Deze hydrograaf is afkomstig uit de hydrograaf zoals deze is weergegeven in figuur 23. Ook zijn in deze figuur de benodigde Waalafvoeren bij verschillende bovenstroomse bodempelen van nevengeul waarbij de nevengeul net watervoerend is.

Om aan te tonen dat het interventiemoment van tijdelijke sedimentreducerende maatregelen een belangrijke rol kan spelen bij de morfologische ontwikkeling van een nevengeul zijn de effecten, voor verschillende waarden van parameter 'Y', zowel geanalyseerd vanaf het moment wanneer de nevengeul een bodempeil van 1,0 m+NAP (interventiemoment A) respectievelijk 1,5 m+NAP (interventiemoment B) heeft bereikt. In de onderstaande figuren is met de onderbroken bruine lijn de oorspronkelijke bodemhoogte (aanlegdiepte in 1997) van de nevengeul weergegeven. Met de donkerrode lijn is de bodemhoogte van de nevengeul in het jaar 2009 weergegeven, die wordt bereikt wanneer geen sedimentreducerende maatregelen worden toegepast. De bruine aaneengesloten lijn geeft de morfologische ontwikkeling van de nevengeul weer in de periode van 1997 – 2001, nadat de tijdelijke sedimentreducerende maatregelen worden ingezet. De overige lijnen geven het verloop van de morfologische ontwikkeling van de nevengeul weer als gevolg van de sedimentreducerende maatregelen. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de volgende maatregelen:

- maatregelen die de sedimentinstroom naar de nevengeul met 100 procent reduceren [Y=5];
- maatregelen die de sedimentinstroom naar de nevengeul met 70 - 80 procent reduceren [Y=2];
- maatregelen die sedimentinstroom naar de nevengeul 30 - 40 procent reduceren [Y = 1,6].





figuur 47: Ontwikkelingen in de nevengeul in relatie met sedimentreducerende maatregelen. (links) zijn situaties waarbij de maatregelen worden ingezet wanneer een bodempeil van 1,0 m+NAP is bereikt (interventiemoment A). (rechts) zijn situaties waarbij de maatregelen worden ingezet wanneer een bodempeil van 1,5 m+NAP is bereikt (interventiemoment B).

9.2.5 Interpretatie numerieke analyses tijdelijke sedimentreducerende maatregelen

Uit bovenstaande numerieke analyses in figuur 47 kan geconcludeerd worden, dat het vroegtijdig ingrijpen met tijdelijke sedimentreducerende maatregelen, zeer belangrijk kan zijn in het verdere verloop van de morfologische ontwikkeling van sedimenterende nevengeulen. Wanneer te veel sedimentatie in de nevengeul heeft plaatsgevonden, als gevolg van de relatieve kleine debietonttrekking door de nevengeul, is de doorstroombreedte van de nevengeul te groot om de nevengeul (grootschalig) erosie te kunnen laten ondervinden. Wel wordt de morfologische ontwikkeling van de nevengeulen vertraagd, doordat het sedimentaanbod naar de nevengeul is afgenomen.

Om erosie in de ongelijkwaardige nevengeul te verkrijgen moet het sedimentaanbod naar de nevengeul sterk gereduceerd worden, zoals te zien bij $Y = 5$ bij interventiemomenten A en B. Dit blijkt ook uit een analytische analyse in Appendix T waarbij alleen erosie in de nevengeul ontstaat wanneer $Y > 2$. Alleen bij interventiemoment A met 100 procent reductie van de sedimentinstroom ($Y=5$) naar de nevengeul wordt het oorspronkelijke bodempeil van de nevengeul binnen een periode van acht jaar (2002 – 2010) weer bereikt. Een aandachtspunt is dat er niet te veel erosie bovenstrooms in de nevengeul ontstaat in verband met instabiliteit van de bandijken.

Wanneer $Y = 2$ (sedimentaanbod naar de nevengeul wordt globaal 70 á 80 procent gereduceerd) treedt er bij interventiemoment A bovenstrooms lichte erosie en benedenstrooms lichte sedimentatie op in de nevengeul. Dit kan verklaard worden, doordat bij een sedimentverdeling ($Y=2$) een evenwichtsbodempeil van ongeveer 0,8 m+NAP bereikt wordt (figuur 35 in paragraaf 7.1.2). Dit geldt ook voor interventiemoment B. Echter in deze situatie treedt er minder erosie op, doordat de doorstroombreedte van de nevengeul groter is. Hierdoor duurt het veel langer voordat de evenwichtsdiepte/bodempeil in de nevengeul bereikt wordt.

Wanneer $Y = 1,6$ (sedimentaanbod naar de nevengeul wordt globaal 30 – 40 procent gereduceerd) treedt er geen erosie op in de nevengeul. Dit komt omdat de instroom van het sediment naar de nevengeul groter is dan de uitstroom van het sediment. Wel treedt er vertraging op in de morfologische ontwikkeling van de nevengeul, doordat de instroom van het sediment naar de nevengeul kleiner is geworden. Wanneer geen sedimentreducerende maatregelen worden toegepast bij interventiemoment A, bereikt de nevengeul bovenstrooms een bodempeil van 1,5 m+NAP binnen de periode van 2002 tot 2010. In de situatie met sedimentreducerende maatregelen wordt bovenstrooms in die periode een bodempeil van 1,3 m+NAP bereikt. Het verschil van een 0,2 meter in het bovenstrooms bodempeil van de nevengeul kan vertaald worden naar een vertraging van globaal 0,03 meter per jaar in de gemiddelde bodemhoogte als gevolg van de sedimentbeheersende maatregelen. Dit geldt ook voor interventiemoment B.

9.2.6 Conclusies sedimentreducerende maatregelen versus ontwikkeling in nevengeulen

Afhankelijk van lokale 2D en 3D stromingspatronen kunnen sedimentreducerende maatregelen zorgen voor een kleinere sedimentinstroom naar de nevengeul, hetgeen resulteert in een meer ongelijke sedimentverdeling tussen de hoofd- en nevengeul. De afvoerdeling op het splitsingspunt zal in de meeste gevallen, als gevolg van de sedimentreducerende constructies, vrijwel niet veranderen. Om te bepalen of deze maatregelen de morfologische ontwikkeling kunnen beïnvloeden zijn in dit onderzoek, in plaats van de maatregelen, alleen mogelijke reducties in de sedimentinstroom naar de nevengeul zelf gesimuleerd. Hierbij leidt een grotere reductie in de sedimentinstroom dan de reductie in het debiet, tot een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul. Een grotere evenwichtsdiepte resulteert weer in een lager evenwichtsbodempeil.

Uitgaande van de situatie, waarbij het evenwichtsbodempeil van de nevengeul lager ligt dan het huidige bodempeil, kan de nevengeul eroderen. Hiervoor moet de instroom van het sediment naar de nevengeul kleiner zijn dan de uitstroom van het sediment en moet de stroomsnelheid in de nevengeul groter zijn dan de aanvangstroomsnelheid in relatie met de 'kritieke Shieldsparameter'. Merk op dat de gemiddelde stroomsnelheid in de nevengeul afneemt, naarmate de nevengeul verder sedimenteert. Als gevolg van deze sedimentatie wordt de profielbreedte van de nevengeul steeds groter, terwijl tegelijkertijd de nevengeul steeds minder debiet onttrekt. Hierdoor wordt het steeds moeilijker om erosie in de nevengeul te realiseren. Er ontstaat bij hogere afvoeren weliswaar erosie (Appendix T), maar doordat deze afvoeren relatief weinig voorkomen heeft dit geen groot effect op de morfologische ontwikkeling van een sedimenterende nevengeul. Om dus erosie te veroorzaken in een nevengeul onder normale omstandigheden, moeten deze maatregelen vroegtijdig worden ingezet en een sterke reductie leveren in de sedimentinstroom (vergelijk interventiemoment A en B waarbij Y gelijk is aan 5 in figuur 47). Doordat deze periodieke mitigerende maatregelen zo vroegtijdig moeten worden aangelegd, ligt het wellicht meer voor de hand deze maatregelen permanent toe te passen, die vanaf het begin werkzaam zijn en de ontwikkeling van de nevengeul vertragen.

Wanneer dit lagere evenwichtsbodempeil nog steeds hoger ligt dan het huidige bodempeil van de nevengeul, zal de verdere morfologische ontwikkeling, in vorm van sedimentatie in de nevengeul, doorgaan. De nevengeul heeft tenslotte zijn evenwichtsdiepte/bodempeil nog steeds niet bereikt. De verdere morfologische ontwikkeling verloopt wel trager, doordat de nevengeul dicht bij zijn evenwichtsdiepte/bodempeil komt te liggen. Met andere woorden: doordat de instroom van het sediment gereduceerd wordt, komt de hoeveelheid in- en uitstroom van het sediment dicht bij elkaar te liggen. Hierdoor treedt minder sedimentatie op in de nevengeul. Om de morfologische ontwikkeling van sedimenterende nevengeulen effectief te vertragen zullen de sedimentreducerende maatregelen permanent en zo mogelijk direct na aanleg van de nevengeul moeten worden ingezet.

Eventuele mogelijke sedimentreducerende maatregelen die kunnen worden toegepast bij sedimenterende nevengeulen zijn volgens Ghimire (2003) en Ankum & Brouwer (1993): i) drempel- en luifelconstructies, ii) 'bandalls', bodem- en drijvende schermen iii) speermuur en een GIBB's Groyne iiiii) stroomgeleidende wanden. Of deze maatregelen daadwerkelijk de morfologische ontwikkeling van een nevengeul (sterk) beïnvloeden is afhankelijk van in hoeverre deze de sedimentinstroom naar een nevengeul daadwerkelijk reduceren. Aangezien sedimentreducerende op zichzelf effectieve maatregelen blijken te zijn, is het aan te bevelen om de daadwerkelijke effecten van deze maatregelen op de sedimentverdeling nader te onderzoeken in 3D modellen.

De verwachting is dat een luifelconstructie de instroom van het sediment naar de nevengeul effectiever kan reduceren dan drempelconstructies, gezien het feit dat nevengeulen grotendeels van het jaar watervoerend moet zijn. Om deze reden is de dwarshelling (afhankelijk van de hoogte) van de drempelconstructie, die het sediment via bodemtransport tegenwerkt, maar beperkt realiseerbaar. Ook blijken de periodieke nevengeulen van Gameren, die voorzien zijn van drempelconstructies, aanzienlijke sedimentatie te ondervinden (Jans, 2004). De sedimentreductie van 'bandalls', bodem- en drijvende schermen zijn afhankelijk van de waterdiepte en zullen zonder extra inspanningen niet altijd optimaal functioneren bij een variërend waterpeil in de rivier. De overige maatregelen zijn grootschaliger waardoor er eerder conflicten kunnen ontstaan met de scheepvaart. Of deze maatregelen ook voldoende sedimentreductie leveren, indien deze kleinschaliger worden toegepast, kan nader onderzocht worden.

Met bovenstaande maatregelen kan de morfologische ontwikkeling in een sedimenterende nevengeul, waarbij gemiddeld 0,08 m/j sedimentatie optreedt, met 5 á 80 jaar vertraagd worden indien de sedimentinstroom met circa 40 á 80 procent wordt gereduceerd.

9.3 Debietregulerende maatregelen en hun effecten

Debietregulerende maatregelen zorgen er in principe voor dat het debiet naar de nevengeul wordt vergroot, bij een zekere afvoer door de moedergeul. Een manier om het debiet naar de nevengeul te vergroten is om het waterpeil op het splitsingspunt te verhogen. Dit kan gedaan worden door een (beweegbare) bodemdrempel in de hoofdgeul te plaatsen benedenstrooms van het splitsingspunt. Een andere manier is om de hoofdgeul benedenstrooms van het splitsingspunt tijdelijk te versmallen door de kribvakken (tijdelijk) te verlengen. Dit kan gedaan worden door middel van caissons of schanskorven. Een langsdam is een andere maatregel waarmee lokaal een waterpeilverhoging gerealiseerd kan worden bij de instroomopening van de nevengeul. De beschrijving van deze drie waterpeilverhogingen worden verder beschreven in paragraaf 9.3.1 en de resultaten in paragraaf 9.3.2. De beschrijving en de resultaten van baggerschuitpompen worden beschreven in paragraaf 9.3.3.

9.3.1 Simulatie met verhoogd waterpeil op het splitsingspunt

Naast dat het debiet naar de nevengeul wordt vergroot, als gevolg van een waterpeilverhoging, zullen nevengeulen in deze situaties ook meer sediment onttrekken. Dit verschijnsel zit (deels) inbegrepen in de splitsingspunt relatie (10). Dit blijkt ook uit appendix L, waarbij het sedimenttransport naar de nevengeul toeneemt wanneer meer debiet naar de nevengeul wordt getransporteerd. Echter de twijfel bestaat of hiermee de toename in het sedimenttransport naar de nevengeul in de juiste verhouding toeneemt. Juist in de situaties waarbij het waterpeil op de gehele splitsingspunt wordt verhoogd (bodemdrempel of dwarsprofielversmalling door middel van schanskorven), kan de toename in het sedimenttransport naar de nevengeul in werkelijkheid nog groter zijn dan dat via de splitsingspunt relatie gebeurt door o.a. het Bulle Effect. Daarentegen zal het Bulle Effect bij de langsdam minder tot geen effect hebben op de sedimentverdeling, doordat hier het water naar de nevengeul minder sterk hoeft te worden afgebogen. In relatie met bovenstaande worden er drie situaties gesimuleerd (tabel 10).

In relatie met bovenstaande worden er drie simulaties uitgevoerd. Situatie A is een situatie waarbij geen peilverhoging is toegepast en vormt de nulsituatie. Hierbij wordt parameter 'Y' gelijkgesteld aan 1,4. Situatie B is een situatie met een waterpeilverhoging als gevolg van een bodemdrempel/vernauwing. Doordat de verwachting is dat hier meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd, als gevolg van onder andere het Bulle Effect, wordt hier een Y-waarde verondersteld van 1,2. Situatie C is een waterpeilverhoging als gevolg van een langsdam, waarbij de Y-waarde gelijk wordt gesteld aan 1,4. Merk op dat de sedimentverdeling in situatie C niet gelijk is aan de sedimentverdeling in situatie A. Dit komt omdat de afvoerdeling tussen deze twee situaties nog steeds verschillen.

tabel 10: hoofdkenmerken van de drie simulaties

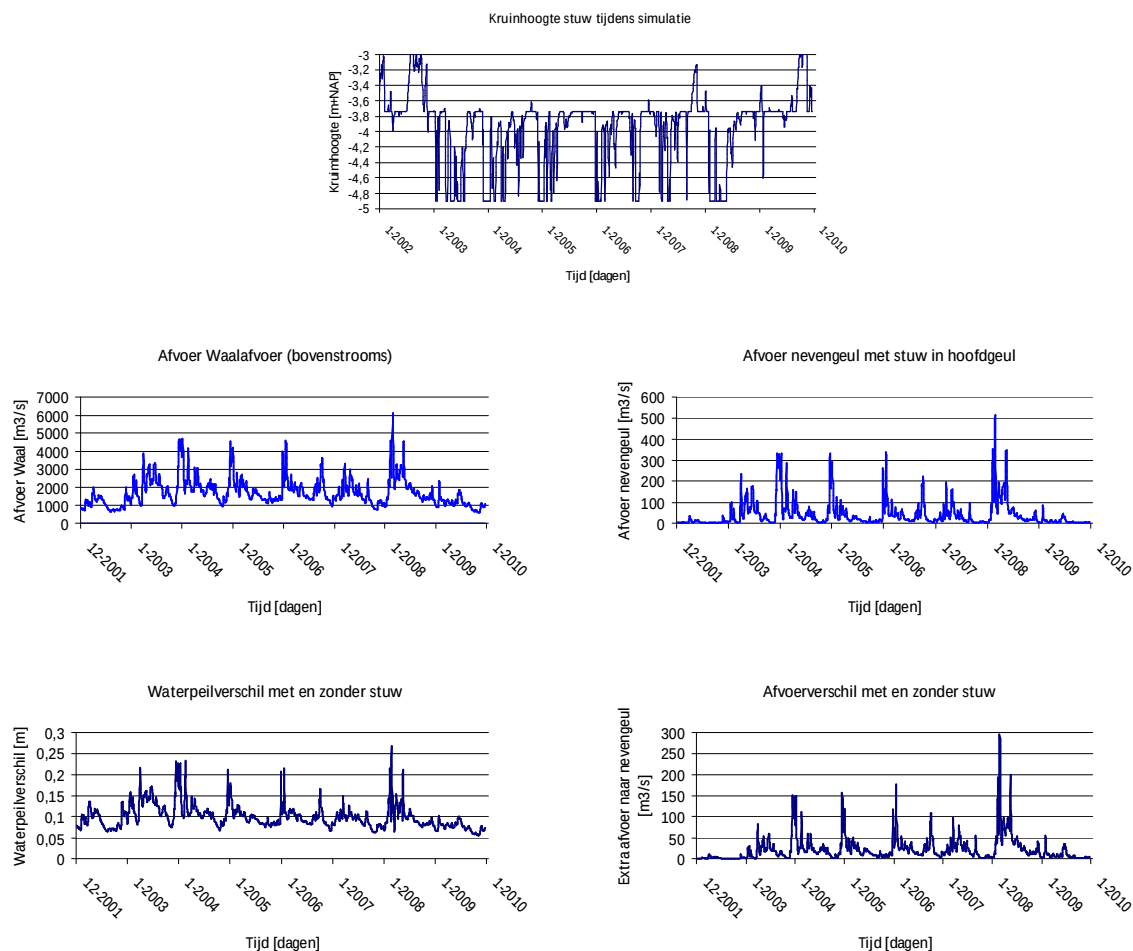
Situatie	Waterpeilverhoging	Parameter 'Y'	Maatregel
A	Nee	1,4	nulsituatie
B	Ja	1,6	bodemdrempel/versmalling
C	Ja	1,4	langsdam

Om een waterpeilverhoging in het SOBEK-RE model te simuleren is er gebruikt gemaakt van een regelbare bodemdrempel (stuw), die benedenstrooms van het splitsingspunt in de hoofdgeul is geplaatst en waarbij de kruinhoogte afhankelijk is van de afvoer die door de rivier wordt getransporteerd (tabel 11). Dit om de waterpeilverhoging en de aanzanding in de hoofdgeul te beperken. De bodemdrempel is in het SOBEK-RE model 1.200 meter stroomafwaarts geplaatst van het splitsingspunt in de hoofdgeul met een breedte van 150 meter. Daarnaast gaat het in deze simulaties meer om de verkregen waterpeilverhoging op het splitsingspunt zelf dan om met welke constructie de waterpeilverhoging tot stand is gebracht.

tabel 11: Kruinhoogte stuw in relatie met Waalafvoer

Waal afvoer [m ³ /s]	Kruinhoogte [m+NAP]
500	-2,5
1.000	-3,75
2.000	-4
2.500	-4,9
7.000	-4,9

In de situaties (A t/m C) is de morfologische ontwikkeling van de nevengeul gesimuleerd met de hydrograaf, zoals deze is weergegeven in figuur 46. In figuur 48 zijn de hydrologische verschillen weergegeven van het watersysteem met en zonder verhoogd waterpeil van situatie C. Ook is de verandering van de kruinhoogte van de bodemdrempel weergegeven over de simulatieperiode.



figuur 48: Hydraulische gegevens in watersysteem tijdens de waterpeilverhoging op het splitsingspunt

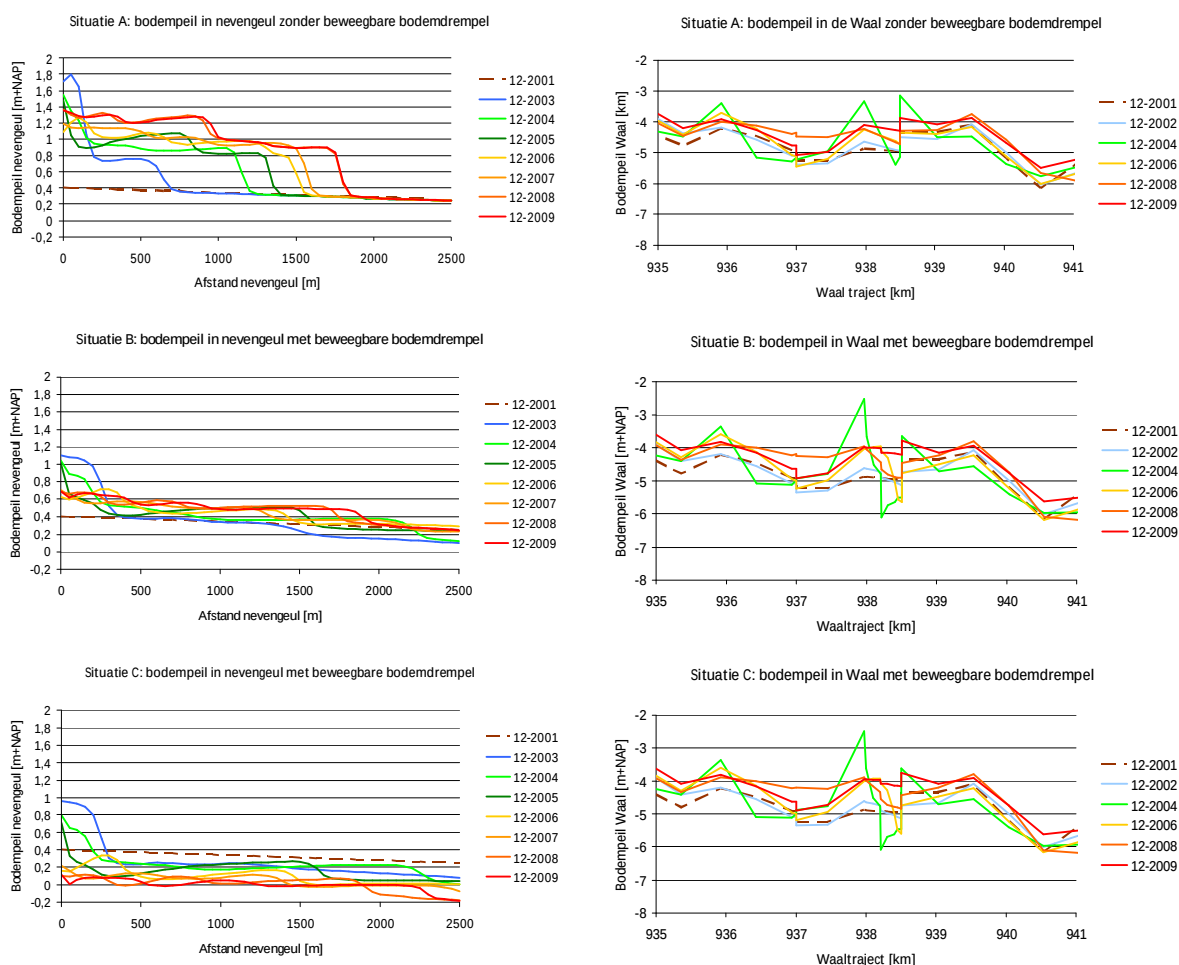
Uit figuur 48 kan het volgende worden afgeleid: In de situatie waarbij de bodemdrempel actief is, varieert het opstuwende waterpeil van 0,05 tot 0,25 m +NAP en wordt er, afhankelijk van de afvoer van de Waal, 0 tot 300 m³/s extra afvoer naar de nevengeul getransporteerd. De grootste veranderingen treden op, wanneer er een afvoer van 6.000 m³/s door de Waal wordt getransporteerd. Vanaf afvoeren die groter zijn dan 2.500 m³/s is de kruinhoogte van de bodemdrempel gelijk aan het oorspronkelijke bodempeil van de Waal 4,9 m +NAP, zie ook tabel 11. Wel is het opvallend dat er continu een waterpeil verschil aanwezig is over de gehele simulatie periode, terwijl de kruinhoogte van de bodemdrempel op sommige momenten gelijk is aan het oorspronkelijke bodempeil. Dit verschijnsel kan verklaard worden doordat er toch enige aanzanding in de hoofdgeul heeft plaatsgevonden.

9.3.2 Effecten Waterpeilverhoging op splitsingspunt

In figuur 49 zijn de morfologische ontwikkelingen van de hoofd- en nevengeul weergegeven. Uit deze figuren kan duidelijk afgeleid worden dat er relatief grote verschillen ontstaan in de morfologische ontwikkeling van de nevengeul. Na een periode van acht jaar heeft de nevengeul in situatie A een bovenstrooms bodempeil bereikt van 1,4 m +NAP. In situatie B, waarbij wel een verhoging van het waterpeil aanwezig is, heeft de nevengeul een bovenstrooms bodempeil bereikt van 0,7 m+NAP. In situatie C heeft de nevengeul een bovenstrooms bodempeil bereikt van 0,1 m+NAP. Gezien het feit dat de nevengeul bovenstrooms in eerste instantie is aangelegd op 0,4 m +NAP is er in deze situatie erosie opgetreden.

De morfologische ontwikkelingen in de hoofdgeul blijven beperkt en lokaal. In het traject van de nevengeul (937 – 938,5) enkele decimeters veranderingen op. Dit verklaart de waterpeilverschillen, als de kruinhoogte van de bodemdrempel gelijk is aan het oorspronkelijke bodempeil van de Waal op 4,9 m +NAP.

In situatie B ($Y = 1,2$) is de sedimentatie in de nevengeul kleiner dan in situatie A ($Y = 1,4$). Dit betekent dat ondanks dat er extra sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd (kleinere Y -waarde), een waterpeilverhoging middels door bodemdrempel of vernauwing toch leidt tot minder sedimentatie in de nevengeul. Blijkbaar is de toename in het debiet toch groter dan de toename in het sedimenttransport. In situatie C ($Y=1,4$) ontstaat zelfs erosie in de nevengeul. Dit betekent volgens deze simulaties dat een langsdam met een lokale waterpeilverhoging effectiever zijn dan een gehele waterpeilverhoging (bodemdrempel of versmalling hoofdgeul door schanskorven). Hierbij is wel verondersteld dat de daadwerkelijke effecten van de maatregelen op de sedimentverdeling beschreven kunnen worden met de waarden die in tabel 10 zijn toegekend aan de Y -waarde.



figuur 49: Ontwikkeling in watersysteem. (boven): ontwikkeling in watersysteem (hoofd en nevengeul) met een beweegbare bodemdrempel in de hoofdgeul waarbij $Y = 1,2$. (middelste): ontwikkeling in watersysteem (hoofd en nevengeul) met een beweegbare bodemdrempel in de hoofdgeul waarbij $Y = 1,4$ (onder) ontwikkeling in watersysteem zonder een beweegbare bodemdrempel in de hoofdgeul waarbij $Y = 1,4$.

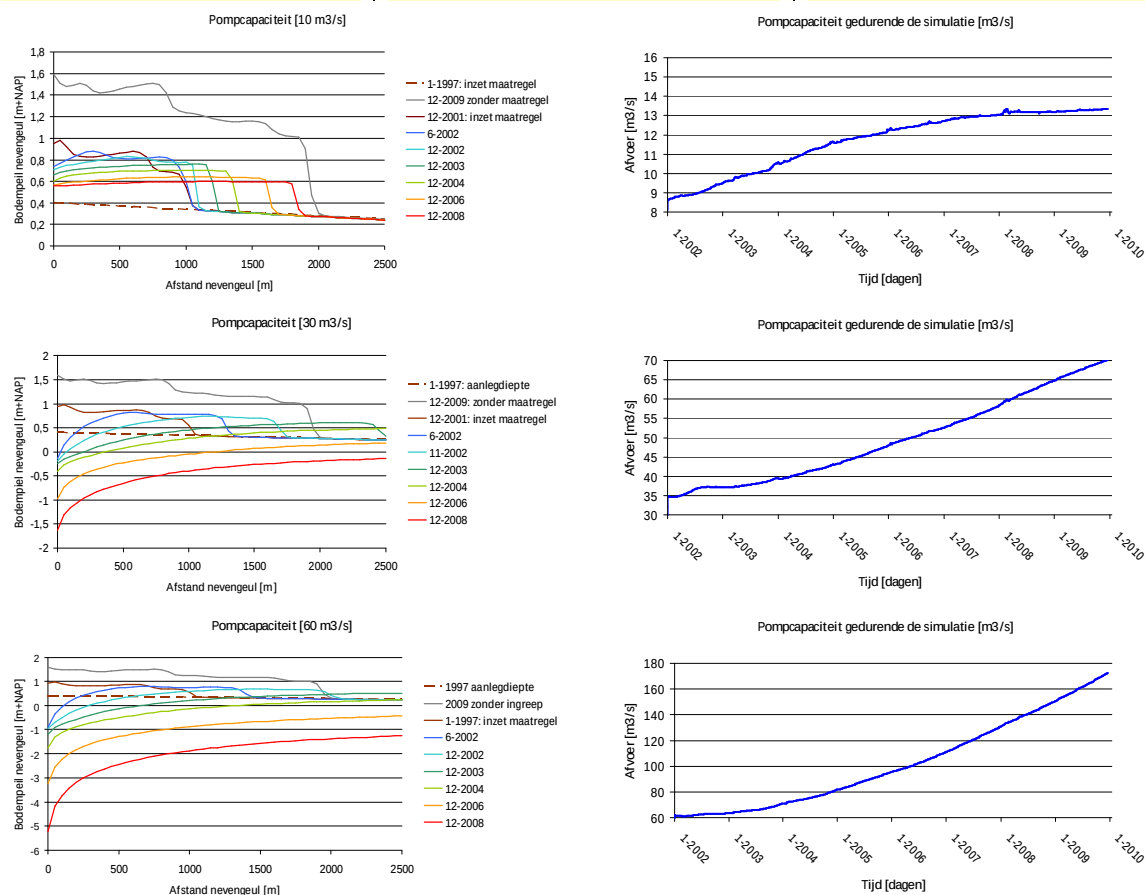
9.3.3 Baggerschuitpompen

De achterliggende gedachte bij het gebruik van (baggerschuit)pompen is om sedimentarm water te onttrekken aan het wateroppervlak van de hoofdgeul en vervolgens te verpompen naar de nevengeul. Merk op dat de nevengeul bovenstrooms is afgesloten met een constructie waardoor de pomp dus geen extra debiet naar de nevengeul verpompt. Om te analyseren welk pompcapaciteit en welk tijdsbestek nodig is om sedimenterende nevengeulen door te spoelen zijn er onderstaand verschillende afvoeren naar de nevengeul gesimuleerd. Om ervoor te zorgen dat er in het SOBEK-RE model zeer weinig sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd, is de splitsingspuntrelatie (vergelijking 10) vervangen door een verdelingstabel. In deze tabel

kan voor een bepaalde afvoerverdeling een te bepalen sedimentverdeling opgegeven worden. Dit is gedaan voor een stationaire afvoer naar de moedergeul. Hierbij is deze afvoer zó gekozen, dat het gewenste debiet naar de nevengeul wordt getransporteerd, rekeninghoudende met een bovenstroomse bodempeil van 1,0 m+NAP in de nevengeul (tabel 12). Natuurlijk neemt het debiet naar de nevengeul toe, nadat erosie is opgetreden. Om deze reden zijn in figuur 50 zowel de ontwikkelingen als het debiet naar de nevengeul in de tijd weergegeven om te kunnen bepalen of de analyse geldig blijft bij gevarieerde pompcapaciteiten van 10, 30 of 60 m³/s.

tabel 12: Afvoer en sedimenttransport naar moedergeul versus afvoer naar nevengeul in relatie met 0,6 m aanzanding

Afvoer naar nevengeul Q_2 [m ³ /s]	Afvoer naar moedergeul Q_0 [m ³ /s]	Sedimenttransport naar moedergeul Q_{s0} [m ³ /s]
10	1.600	0,03
30	2.200	0,06
60	2.600	0,08



figuur 50: Ontwikkeling in nevengeul bij pompcapaciteiten waarbij nevengeul bovenstrooms is afgesloten met constructie.

Wanneer een debiet van 10 m³/s naar de nevengeul wordt getransporteerd treedt er zeer lichte erosie op. Het materiaal dat voornamelijk bovenstrooms in de nevengeul wordt geërodeerd, wordt voor een groot deel benedenstrooms opnieuw afgezet. Het is dus met een pompcapaciteit van 10 m³/s niet mogelijk om de nevengeul, zoals gedefinieerd in paragraaf 7.2, in zijn geheel te eroderen tot aan de aanlegdiepte.

In de situatie waarbij 30 m³/s naar de nevengeul wordt getransporteerd treedt wel sterke erosie op. Bij deze afvoer, met een zeer lage instroom van ontstaan er stroomsnelheden in de nevengeul die groter zijn dan de aanvangsstroomsnelheid om het sediment te kunnen transporteren. Ondanks de grotere erosie zal het nog 2 jaar duren om de sedimentatie in de nevengeul tot aan de oorspronkelijke aanlegdiepte ongedaan te maken. Merk op dat er bovenstrooms in de nevengeul te veel erosie ontstaat. In de praktijk kan men de afsluitconstructie en de pomp(en) stroomafwaarts bewegen, waardoor in de nevengeul grote erosie bovenstrooms voorkomen en verdere erosie benedenstrooms versneld kan worden. Het wegspoelen van de

volledige sedimentatie, die in de nevengeul is opgetreden, zal hierdoor veel minder lang duren (deze effecten kunnen niet gesimuleerd worden in het SOBEK-RE model en zijn hier dus niet bestudeerd).

Hetzelfde geldt voor de situatie waarbij een debiet van $60 \text{ m}^3/\text{s}$ naar de nevengeul wordt getransporteerd. In deze situatie, als gevolg van een groter debiet naar de nevengeul, zal de nevengeul nog veel sneller eroderen.

Uit bovenstaande analyse kan geconcludeerd worden dat er voor de hier beschouwde ‘standaard nevengeul’ een debiet van meer dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ nodig is om de nevengeul afdoende door te kunnen spoelen. Deze capaciteiten zijn echter niet eenvoudig te verpompen. In de praktijk kunnen deze capaciteiten slechts bereikt worden met pompen die in gemalen of op baggerschuiten worden toegepast. Gemalen kunnen beschikken over een pompcapaciteit van $20 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Waterschap Rijn en IJssel, 2009 ; Ministerie verkeer en waterstaat, 2004). Mogelijk dat een vergelijkbare pomp op een vaartuig geplaatst kan worden, waarmee dit type maatregel ingezet kan worden bij verschillende sedimenterende nevengeulen. Nadat het gewenste bodempeil bereikt is in de nevengeul, zou dit vaartuig weer verplaatst kunnen worden naar een andere sedimenterende nevengeul.

9.3.4 Conclusies debietregulerende maatregelen versus ontwikkeling in nevengeulen

Debietregulerende maatregelen zijn hier gedefinieerd als maatregelen die het debiet naar de nevengeul reguleren. Door (lokale) waterpeilverhogingen op het splitsingspunt kan het debiet naar de nevengeul tijdelijk of permanent naar de nevengeul worden vergroot. Deze maatregelen zullen alleen een eroderend effect hebben op de morfologische ontwikkeling van een nevengeul, indien de toename in het debiet naar de nevengeul groter is dan de toename in het sedimentaanbod.

Waterpeil verhoging

Juist bij een bodemdrempel of dwarsprofielvernauwingen (schanskorven) in de hoofdgeul, waarbij het waterpeil op het gehele splitsingspunt wordt verhoogd, zal naar verwachting zonder aanvullende maatregelen, het sedimenttransport naar de nevengeul extra toenemen als gevolg van o.a. het Bulle Effect. Ondanks dat bij de simulatie het sedimenttransport naar de nevengeul extra is verhoogd, blijkt de nevengeul nog steeds minder sedimentatie te ondervinden in vergelijking met een situatie waarbij geen peilverhoging is toegepast en waarbij het sedimenttransport lager is (situatie A en B in figuur 49). Hierbij is wel verondersteld dat de daadwerkelijke effecten van de maatregelen op de sedimentverdeling gesimuleerd kunnen worden met een lagere Y-waarde. Nader onderzoek in 3D modellen blijft nodig om te analyseren of deze verschijnselen op deze manier gesimuleerd kunnen worden in een 1D model.

Een andere maatregel is om een langsdam te plaatsen bovenstrooms van de instroomopening van een nevengeul, waarmee lokaal een waterpeilverhoging gerealiseerd kan worden. Doordat het water minder hoeft te worden afgebogen zal naar verwachting het Bulle Effect een kleinere invloed hebben op de sedimentverdeling. Daarnaast kan deze maatregel deels als een sedimentvang reageren, doordat in de langsdam de stroomsnelheid wordt verlaagd. Om deze redenen is de langsdam gesimuleerd met een waterpeilverhoging, waarbij de instroom van sediment niet extra is verhoogd. Om deze reden worden nevengeulen effectiever (permanent) doorgespoeld (situatie C in figuur 49), waardoor de sedimentatie in de nevengeul nog meer afneemt.

Bovenstaande maatregelen zullen voor sedimentatie in de hoofdgeul zorgen. Bij kleine waterpeilverhogingen van 0,05 – 0,25 meter blijft deze sedimentatie in de hoofdgeul beperkt tot hooguit enkele decimeters. Juist in riviertrajecten met autonome bodemdaling vormt dit geen probleem. Het voordeel van een beweegbare bodemdrempel is dat de morfologische ontwikkeling in de nevengeul gereguleerd kan worden. Daarentegen zullen de kosten wel veel hoger zijn. Het voordeel van een langdam is dat tegelijkertijd een verbetering tot stand kan worden gebracht aan ecologische oevers in de uiterwaarden.

Baggerpompen

Het grote voordeel van een (bagger)pompen is dat het debiet naar de nevengeul kunstmatig wordt gereguleerd, waarbij tegelijkertijd de sedimentinstroom 100 procent gereduceerd kan worden. Wel moet hierbij de nevengeul bovenstrooms met een constructie afgesloten worden en moet er sedimentarm water uit de hoofdgeul aan het wateroppervlak onttrokken worden. Uit een nadere analyse is gebleken dat een pompcapaciteit van meer dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ benodigd is om relatief sterke erosie in een nevengeul te realiseren, die in de stromingsrichting van de nevengeul wel steeds verder afneemt (figuur 50). Dit heeft te maken met het

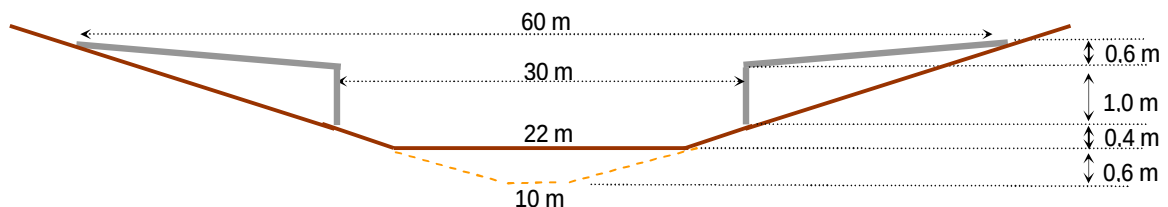
feit dat de transportcapaciteit van het sediment in de nevengeul voor een groot deel steeds weer benut wordt door het sediment dat bovenstrooms geërodeerd wordt. Om deze reden duurt het in deze simulaties nog steeds circa 2 jaar om de sedimentatie van een 0,5 meter door te spoelen tot aan de oorspronkelijke aanlegdiepte van de nevengeul. In de praktijk kan men de nevengeul vanuit benedenstrooms door 'flushen', waardoor het sediment niet door de gehele nevengeul getransporteerd hoeft te worden. Ook kan de afsluitconstructie en de pomp tijdens het 'flushen' stroomafwaarts verplaatst worden, nadat het oorspronkelijke bodempeil van de nevengeul is bereikt. Op beide manieren kan de nevengeul effectiever worden doorgespoeld. Deze effecten kunnen niet eenvoudig gemodelleerd worden in een 1D model. De verwachting is wel dat op deze manier de inzet van de maatregel sterk gereduceerd kan worden tot minder dan een half jaar.

Een pompcapaciteit van meer dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kan slechts bereikt worden met pompen die doorgaans op baggerschuiten of in gemalen worden toegepast en waarvan de aanschafkosten relatief hoog zullen zijn. Door deze pomp op een baggerschuit te plaatsen, kan deze relatief eenvoudig verplaatst en ingezet worden bij andere sedimenterende nevengeulen. De totale exploitatiekosten (Total Cost of Ownership) kunnen hierdoor uiteindelijk lager zijn dan alle andere maatregelen. Verder zijn de voordelen, dat de effectiviteit van de maatregel onafhankelijk is van de afvoercondities van de rivier en indien wenselijk op elk moment kan worden ingezet. Verder kan er in de nevengeul erosie in de nevengeul gerealiseerd worden bij debietcapaciteiten die ook onder normale omstandigheden naar de nevengeul getransporteerd worden. Dit zorgt ervoor dat de verstoring van de nevengeul uit het oogpunt van de ecologie beperkt blijft.

9.4 Dwarsprofielregulerende maatregelen en hun effecten

Zoals beschreven in paragraaf 7.3 is er verondersteld dat er in de nevengeul moet worden ingrepen wanneer ongeveer 10 procent van het doorstroomoppervlak gesedimenteerd is. Aangezien met deze maatregel de doelstelling is om de nevengeul lokaal door te 'flushen', is het van belang om vroegtijdig in te grijpen. Dit in verband met een steeds kleinere debietonttrekking van de nevengeul als gevolg van sedimentatie. Om deze reden is ervoor gekozen om het dwarsprofiel van de nevengeul lokaal te verkleinen, zodra de nevengeul bovenstrooms een bodempeil heeft bereikt van 1 m+NAP.

Normaliter kan voor een geselecteerde maatregel met behulp van de functie 'restart file' in het SOBEK-RE model de morfologische ontwikkeling van een nevengeul, op een bepaald tijdstip, weer gebruikt worden in een nieuwe simulatie. Vanwege foutmeldingen in het model is het niet gelukt om de 'restart-file' te combineren met deze maatregel. Om deze reden is er voor gekozen om de morfologische ontwikkeling van de nevengeul zelf te vertalen in de dwarsprofielen. Hierbij is aangenomen dat er over de hele lengte van de nevengeul ($L_2 = 2500$ meter) sedimentatie heeft plaats gevonden van 0,6 meter. Vervolgens is op de trajectlengte van 500 – 1000 meter van de nevengeul het dwarsprofiel van de nevengeul verkleind tot aan de sedimenttransporterende breedte van 30 meter, zie figuur 51.



figuur 51: Schematisatie van de dwarsprofielverkleining door middel van bijvoorbeeld schanskorven.

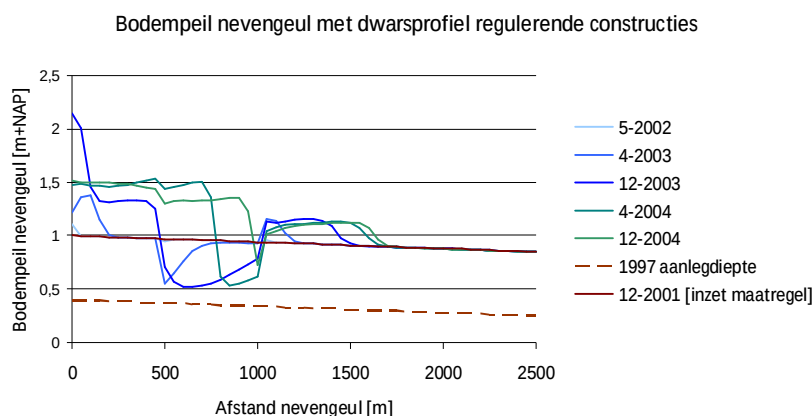
In het SOBEK-RE model kan de stromingsweerstand worden opgegeven in een drietal secties over de dwarsprofiel, stromingsweerstand hoofdsectie, stromingsweerstand uiterwaarden 1 en stromingsweerstand uiterwaarden 2. In tabel 13 is weergegeven hoe de stromingsweerstand is meegenomen, al dan niet met schanskorf, in de nevengeul over de dwarsprofielsecties.

tabel 13: Overzicht van de opgegeven stromingsweerstand over de verschillende dwarsprofielen

	Breedte Hoofdsectie	Weerstand hoofdsectie	Breedte uiterwaarden 1	Weerstand uiterwaarden 1	Breedte uiterwaarden 2	Weerstand uiterwaarden 2
Dwarsprofiel zonder schanskorf	30	0,18	0,01	0,4	60	0,2
Dwarsprofiel met schanskorf	30	0,18	30	0,4	30	0,2

Uit deze analyse met de hydrograaf, zoals weergegeven in figuur 46, blijkt dat de Waalafvoer groter moet zijn dan $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ om enige erosie te veroorzaken in het traject waar de schanskorven zijn geplaatst (500 m – 1000 m). Dit omdat de morfologische ontwikkeling van de nevengeul bijna niet is veranderd in het jaar 2002 (figuur 52). Ook heeft dit te maken met het niet watervoerend zijn van de nevengeul gedurende het jaar 2002, als gevolg van een te laag waterpeil op het splitsingspunt met afvoeren die lager zijn dan $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Tijdens afvoeren die groter zijn dan $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ontstaat er wel erosie in de nevengeul op het traject waar de schanskorven zijn geplaatst. Dit sediment wordt echter meteen weer benedenstrooms afgezet voorbij de dwarsprofielversmalling van de nevengeul. Ook is goed te zien dat er bovenstrooms in de nevengeul sedimentatie optreedt, als gevolg van een kleinere debietonttrekking door de nevengeul gerelateerd aan de verhoging van de stromingsweerstand. Hierdoor wordt de stroomsnelheid lager waardoor juist weer sedimentatie ontstaat. Het is opvallend dat deze sedimentatie, in vorm van een sedimentatiefront, zich naar verloop van tijd weer stroomafwaarts beweegt en uiteindelijk weer de initiële erosie van de dwarsprofielverkleining geheel opvult.

Uit andere analyses, waarbij het traject van de dwarsprofiel verkleining is verkleind, blijft de aanzanding na en voor de dwarsprofielverkleining bestaan. Hieruit kan geconcludeerd worden dat dwarsprofielregulerende maatregelen, die in de nevengeul zelf geplaatst worden, geen uitkomst bieden voor het beheer van sedimenterende nevengeulen. Naast de lokale verhoging van de stroomsnelheid wordt het debiet naar de nevengeul te sterk gereduceerd. Hierdoor wordt de stroomsnelheid bovenstrooms en benedenstrooms van de versmalling weer verlaagd waardoor hier juist weer sedimentatie ontstaat.



figuur 52: Bodempeil ontwikkeling in nevengeul met dwarsprofiel regulerende constructies in het traject van 500 meter – 1000 meter. De hydrograaf waarbij deze ontwikkeling tot stand is gekomen staat weergegeven in figuur 46.

De effecten van ‘bandalls’ in een nevengeul, afhankelijk van 2D en 3D stromingspatronen, kunnen niet gesimuleerd worden in een 1D model. De praktijk leert dat deze hoofdzakelijk voor herprofilering zorgen in een waterloop, waarbij het sediment dat wordt geërodeerd hoger wordt afgezet op de oever. Dit vergroot de hoofdstroom, waardoor de afvoercapaciteit groter wordt. Merk op dat de totale afvoercapaciteit wel is afgenomen. Om deze reden zullen bandall's in een nevengeul hooguit een vertraging geven in de grootschalige onderhoudstermijn. Aangezien bandall's in de nevengeul geplaatst moeten worden en telkens verplaatst moeten worden, is het wellicht beter en effectiever om sedimentreducerende maatregelen toe te passen, er van uitgaande dat deze voldoende reductie kunnen geven van de instroom van sediment naar de nevengeul.

9.5 Morfologisch ‘neutraal’ ontwerpen in nevengeulen in verband met evenwichtsdiepte

Momenteel wordt de diepteligging/geometrie van een nevengeul hoofdzakelijk op basis van hydraulische en ecologische gronden bepaald. Aan de hand van de ecologische doelstellingen, die aan de nevengeul worden opgelegd, wordt de frequentie van stroomvoerendheid van de nevengeul bepaald. Door vervolgens deze frequentie af te lezen in de debiet-waterstand relatie van de rivier op de locatie van de instroomopening van de nevengeul kan de minimale diepteligging van de nevengeul bepaald worden. Deze methode is ook toegepast bij de nevengeulen van Gameren zoals beschreven in het rapport “Ontwerp nevengeul Gameren: natuurontwikkelingsproject Gamerensche Waarden, (RIZA, 1996)” geschreven door Royal Haskoning. Daarnaast worden in nevengeulen hoofdzakelijk flauwe oevertaluds aangelegd voor vestigingsmogelijkheden van vegetatie en paaiplekken voor stroomminnende vissen. Ook moet de stroomsnelheid in de nevengeul globaal liggen tussen 0,1 en 0,3 m/s, omdat de nevengeulen doorgaans morfologisch ‘laag-actief’ worden aangelegd, waarbij behalve tijdens hoogwaters geen sedimenttransport mag optreden. Zie hiervoor ook appendix G.

Bij deze ontwerpaanpak is het opvallend dat er geen rekening wordt gehouden met de morfologische evenwichtssituatie van het watersysteem. Zowel uit de analytische parametrisatie als met de numerieke berekeningen uit het SOBEK-RE model is gebleken dat nevengeulen wel degelijk naar een evenwichtsdiepte toewerken en die eventueel kunnen bereiken. Wanneer een nevengeul aan de hand van deze methode onder (resp. boven) zijn evenwichtsdiepte en met een zekere sedimentverdeling wordt aangelegd, wordt het sedimenteren (resp. eroderen) van een nevengeul eigenlijk al indirect opgelegd. Indien een nevengeul wordt aangelegd rondom zijn evenwichtsdiepte, kan het beheer en onderhoud aan sedimenterende nevengeulen uit het oogpunt van veiligheid, door middel van andere sedimentbeheersende maatregelen, gereduceerd of misschien zelfs wel voorkomen worden. Bovendien kunnen hogere stroomsnelheden worden toegelaten, waardoor de nevengeul in horizontale zin morfologisch actief (of actiever) kan zijn.

Een rivier met uiterwaarden is een dynamisch natuurlijk systeem, waar altijd sprake zal zijn van een dynamisch evenwicht tengevolge van verstoringen. Deze schommelingen rondom het evenwicht zullen in het algemeen geen grote nadelige gevolgen hebben voor het behoud van de benodigde maatgevende afvoercapaciteit van de nevengeul. Dit komt omdat bij stabiele situaties ($Y > n/3$) het watersysteem altijd terugkeert naar zijn oorspronkelijke evenwicht, zie appendix K. Gesteld kan worden dat de nevengeul morfologisch ‘neutraal’ wordt aangelegd in het geval een nevengeul op zijn evenwichtsdiepte wordt aangelegd voor de morfologisch gemiddelde omstandigheden. Dit betekent dat er gemiddeld genomen wel sedimenttransport naar de nevengeul plaatsvindt, maar dat deze hoeveelheid sediment ook weer uit de nevengeul wordt getransporteerd. Dit betekent dat er minder erosie of sedimentatie plaatsvindt in de nevengeul. Dit biedt de mogelijkheid om hogere stroomsnelheden toe te passen in de nevengeulen, hetgeen vanuit de ecologie wenselijk is voor de ontwikkeling van stroomminnende pioniersvegetatie en voor horizontale morfodynamische processen.

De evenwichtssituatie in een watersysteem wordt bepaald door de sedimentverdeling, die vervolgens weer afhankelijk is van de geometrie/aanlegdiepte van de nevengeul. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de geometrie/licging van een rivier een gegeven is en dat de sedimentverdeling niet direct wordt beïnvloed door sedimentreducerende constructies bij de instroomopening van de nevengeul. Deze oplossingsrichting is besproken bij sedimentreducerende maatregelen. Daarnaast kan de aanlegdiepte/evenwichtsdiepte van een nevengeul worden afgelezen bij een bepaalde sedimentverdeling in figuur 33 en in figuur 35. Bij een nevengeul, die een groot deel van het jaar meestromend moet zijn (zie definitie in paragraaf 3.1), kan de aanlegdiepte echter niet te veel variëren. Daarom is het van belang om te analyseren hoe het ontwerp van een nevengeul (geometrieparameters L_2 , B_2 en C_2) de evenwichtsdiepte kan beïnvloeden bij stabiele situaties ($Y > n/3$). Instabiele situaties ($Y < n/3$) worden hier buiten beschouwing gelaten en hebben zich tevens tot op heden nog niet voorgedaan.

In de splitsingspuntrelatie, zoals weergegeven in vergelijking (10) wordt de sedimentverdeling op het splitsingspunt bepaald door parameter ‘Y’ en de afvoerverdeling. In het algemeen zal parameter ‘Y’, bij ongelijkwaardige nevengeulen, de grootste invloed hebben op de sedimentverdeling. Dit komt omdat de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) tussen de hoofdgeul en de nevengeul al relatief groot is ($Q_1 > Q_2$) en in principe veel meer sediment naar de hoofdgeul wordt getransporteerd. Dit is ook de reden waarom parameter ‘Y’ in het model met de hoogte van de evenwichtsdiepte hoofdzakelijk bepaalt of ongelijkwaardige nevengeulen gaan

sedimenteren of eroderen. Juist bij relatieve lage Y-waarden (resp. relatieve hoge Y-waarden) treedt er sedimentatie (resp. erosie) op bij ongelijkwaardige nevengeulen. De geometrieparameters van nevengeulen (C_2 , B_2 en L_2) kunnen de evenwichtsdiepte wel beïnvloeden. Dit komt omdat de geometrie van de nevengeul in eerste instantie de afvoerverdeling op het splitsingspunt beïnvloedt en vervolgens ook weer een enige verandering teweeg brengt in de sedimentverdeling (ondanks dat parameter ‘Y’ gelijk blijft).

In paragraaf 5.6.1 is al een analytische gevoeligheidsanalyse gedaan naar de geometrieparameters van de nevengeulen bij verschillende Y-waarden (sedimentverdelingen) op het splitsingspunt. Hieruit is naar voren gekomen dat de effecten van de geometrie parameters een omslagpunt kunnen vertonen in het vergoten (resp. verkleinen) van de evenwichtsdiepte in de nevengeul in relatie met parameter ‘Y’. Deze verschijnselen kunnen relatief eenvoudig worden afgeleid uit vergelijking (11). Hieruit blijkt dat een toename (resp. afname) in de waterdiepteverhouding, in relatie met een toename (resp. afname) in de lengte (L_2) en de weerstand (C_2) van de nevengeul, afhankelijk is van of parameter ‘n’ groter (resp. kleiner) is dan parameter ‘Y’. Een toename in de breedte van de nevengeul (B_2) leidt daarentegen altijd tot situaties, waarbij de evenwichtsdiepte in de nevengeul kleiner wordt. Dit heeft te maken met het feit, dat de sedimentverdeling via de splitsingspuntrelatie direct wordt beïnvloed door de breedte van de nevengeul. Deze verschijnselen staan ook weergegeven in de grafieken van paragraaf 5.6.1 en in de grafieken van appendix S.

$$\frac{h_1}{h_2} = \left\{ \frac{1}{X} \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{n-Y} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{n-Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-Y} \right\}^{\frac{2}{3Y-n}} \quad (11)$$

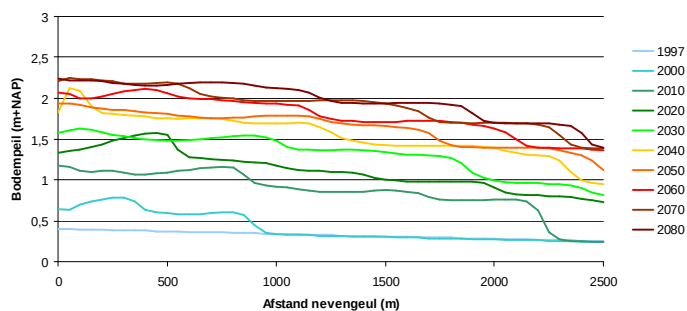
Om te bepalen hoe snel deze evenwichtsdieptes worden bereikt en of deze verschijnselen zich ook voordoen in het SOBEK-RE model wordt er ook een numerieke analyse gemaakt met een 80 jarige hydrograaf. Hierbij wordt telkens één geometrieparameter (L_2 , B_2 en C_2) veranderd ten opzichte van het standaardontwerp zoals gedefinieerd in paragraaf 7.2, zie ook figuur 63 in appendix Q. Daarnaast wordt elk ontwerp zowel berekend voor $Y = 1,6$ ($Y < n$) en voor $Y = 5$ ($Y > n$) waarbij gevarieerd wordt met:

- Lengte nevengeul [$L_2 = 1600$ meter ; $L_2 = 5000$ meter]
- Breedte nevengeul [$B_2 = 50$ meter ; $B_2 = 200$ meter]
- Stromingweerstand nevengeul door middel van de ruwheidshoogte [$k_s = 0,1$ meter ; $k_s = 0,4$ meter]

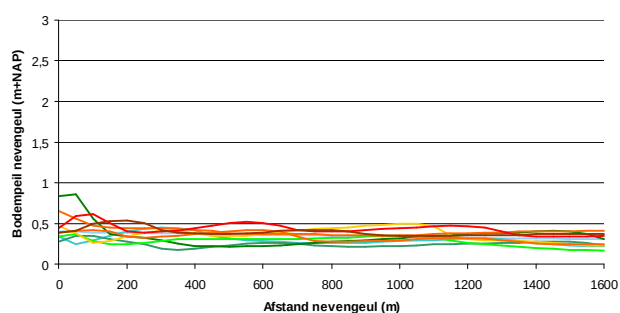
In figuur 53 en in figuur 54 wordt eerst de morfologische ontwikkeling van de nevengeul weergegeven, waarbij de waarden van de geometrieparameters, zoals deze gedefinieerd zijn in het basisontwerp, niet zijn veranderd. Daaronder volgen de morfologische ontwikkelingen van de nevengeulen waarbij de geometrieparameters afzonderlijk wel zijn veranderd. In de vergelijking of het bodempeil lager (resp. hoger) is dan het bodempeil in de referentie situatie, kan er bepaald worden of de evenwichtsdiepte is vergroot of juist is verkleind.

Ontwerpprofielen in relatie met $Y = 1,6$ waarbij sedimentatie optreedt in de ongelijkwaardige nevengeul

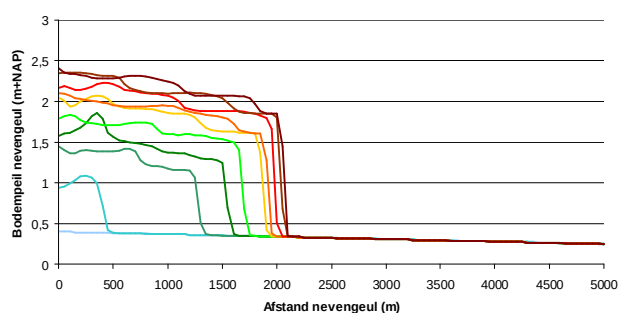
Bodempeil nevengeul met hydrograaf ; $Y=1,6$ standaard situatie



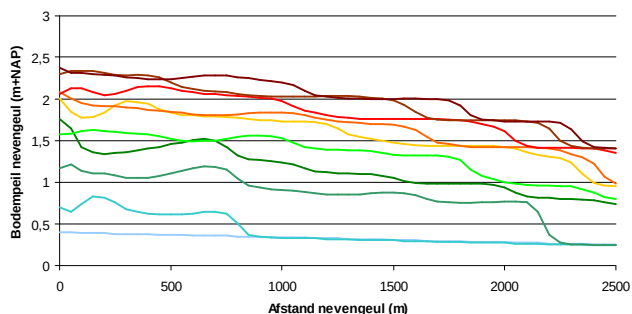
Bodempeil kortere nevengeul ($L_2 = 1600$; $Y = 1,6$)



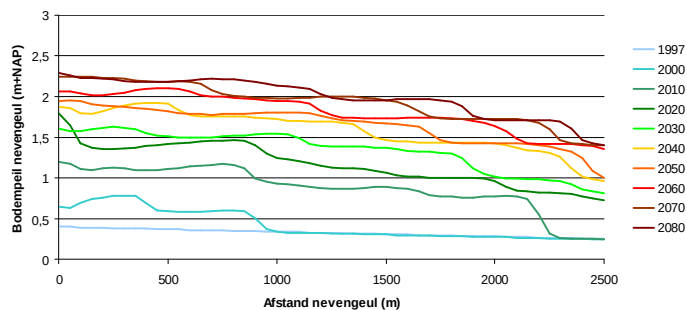
Bodempeil langere nevengeul ($L_2 = 5000$ m) met $Y = 1,6$



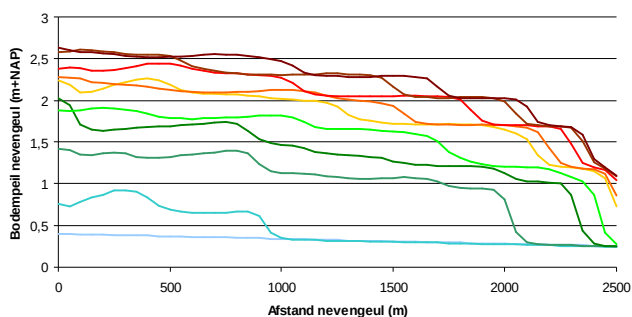
Smallere nevengeul ; $Y=1,6$



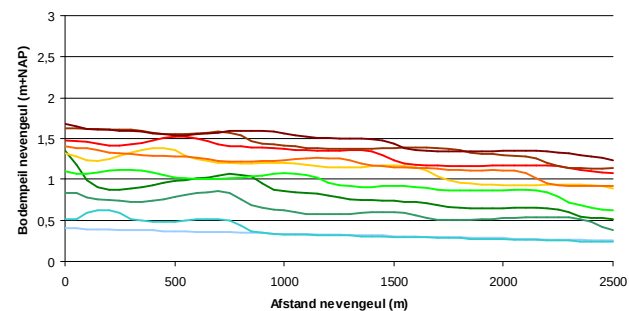
Bredere nevengeul $Y=1,6$



Lagere stromingsweerstand in nevengeul ($k_s=0,1$) ; $Y=1,6$



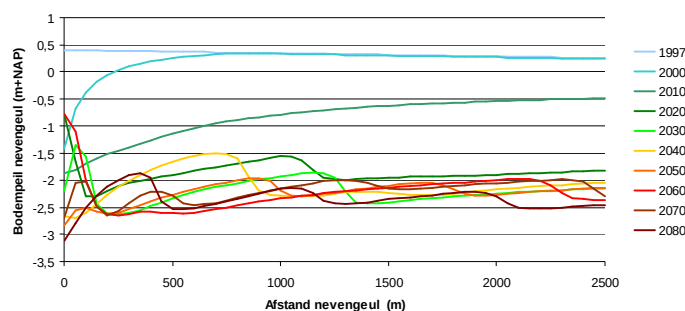
Grotere stromingsweerstand nevengeul ($k_s=0,4$) ; $Y=1,6$



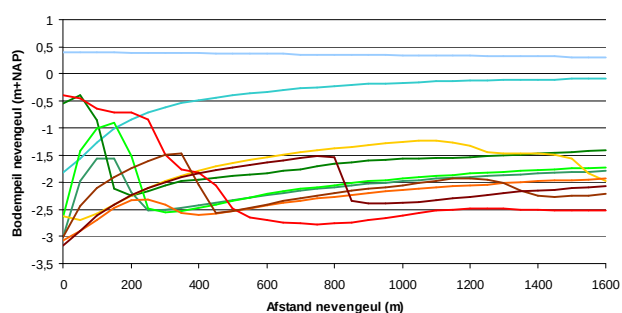
figuur 53: effecten geometrieparameters (L_2 , B_2 en C_2) op evenwichtsdiepte van de nevengeul bij sedimentverdelingen waarbij $n/3 < Y < n$

Ontwerpprofielen in relatie met $Y = 5$ waarbij erosie optreedt in de ongelijkwaardige nevengeul

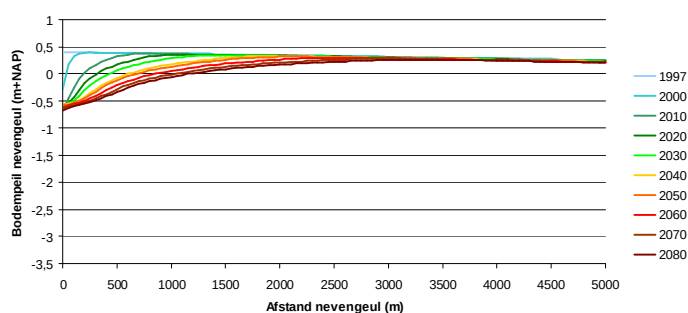
Bodempeil nevengeul met hydrograaf ($Y=5$)



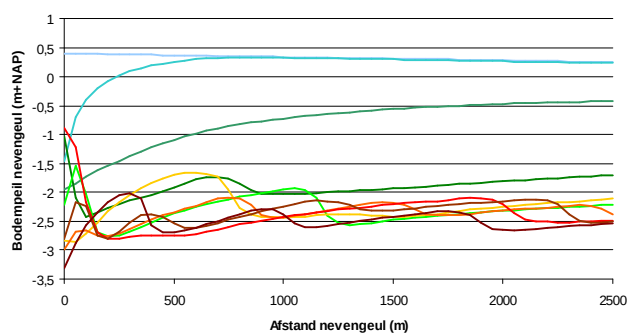
Bodempeil kortere nevengeul ($L_2=1600$ m ; $Y=5$)



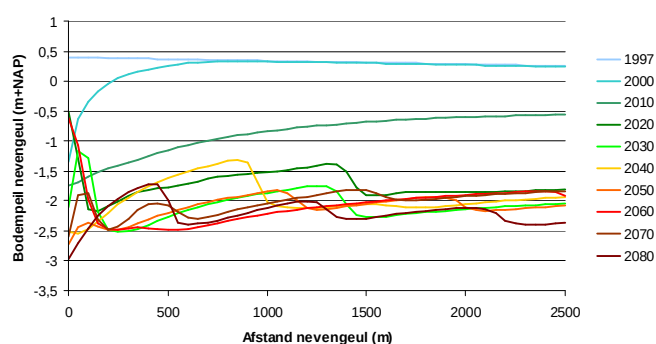
Bodempeil langere nevengeul ($L_2=5000$ m ; $Y=5$)



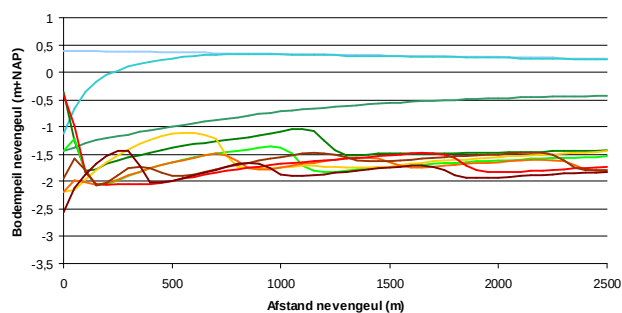
Smallere nevengeul $Y=5$



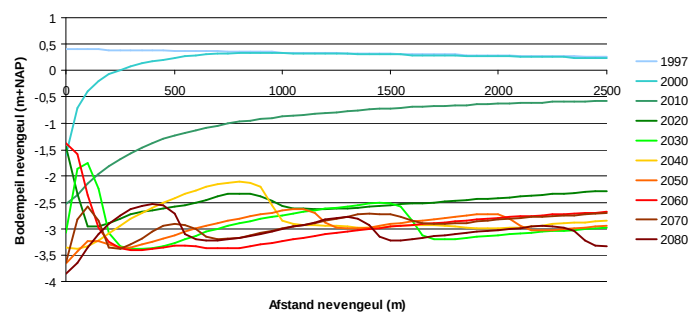
Bredere nevengeul ; $Y=5$



Lagere stromingsweerstand nevengeul ($ks=0,1$) ; $Y=5$



Grotere stromingsweerstand nevengeul ($ks=0,4$) ; $Y=5$



figuur 54: effecten geometrieparameters (L_2 , B_2 en C_2) op evenwichtsdiepte van de nevengeul bij sedimentverdelingen waarbij $Y > n$

9.5.1 Vergelijking analytische en numerieke resultaten versus effecten op evenwichtsdiepte.

Uit de voorgaande grafieken kan worden afgeleid dat de lengte (L_2) en de stromingsweerstand (C_2) van de nevengeul met een zekere sedimentverdeling een relatief grote invloed hebben op de evenwichtsdiepte. De breedte van de nevengeul heeft maar weinig effect op de evenwichtsdiepte. Dit komt omdat het debiet en het sedimentaanbod naar de nevengeul min of meer gelijkwaardig toe of afneemt. Aangezien de stromingsweerstand van de nevengeul minder gemakkelijk valt te beïnvloeden op langere termijn, kan de lengte van de nevengeul een goede uitkomst bieden om de morfologische activiteit van een nevengeul te neutraliseren. Om de analyse overzichtelijk te houden worden de situaties waarbij $Y = 1,6$ en $Y = 5$ onderstaand apart besproken. Hierdoor is het mogelijk om zowel voor de situatie $n/3 < Y < n$ en voor de situatie $Y > n$ aparte ontwerprichtlijnen op te stellen om de morfologische ontwikkelingen in de nevengeul te beperken.

Nevengeulen die een sedimentverdeling hebben waarbij 'Y' relatief klein is ($n/3 < Y < n$):

In de onderstaande beschrijvingen wordt er telkens aangegeven of er een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte ontstaat in de nevengeul in relatie met de parameters L_2 , B_2 en C_2 .

- Een kortere (resp. langere) nevengeullengte resulteert in een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte van de nevengeul en geeft dus minder (resp. meer) sedimentatie.

Dit verschijnsel blijkt zowel uit de analytische als de numerieke analyse. In dit geval leidt een kortere nevengeullengte tot een grotere toename in het debiet dan in een toename in het sedimentaanbod. Hierdoor wordt de evenwichtsdiepte in de nevengeul groter, waardoor er een lager evenwichtsbodempeil wordt bereikt. Dit zorgt ervoor dat er minder sedimentatie in de nevengeul optreedt. De redenering geldt ook omgekeerd indien de lengte van de nevengeul groter wordt.

- Een smallere (resp. bredere) nevengeul resulteert in een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte van de nevengeul en geeft dus minder (resp. meer) sedimentatie.

Ten eerste is uit de analytische resultaten gebleken dat de effecten op de evenwichtsdiepte minimaal zijn. Toch verschillen de analytische resultaten enigszins met de numerieke resultaten. Een smallere nevengeul geeft in de numerieke analyse juist een iets kleinere evenwichtsdiepte. Hetzelfde gebeurt wanneer de breedte van de nevengeul groter wordt. Dit kan verklaard worden doordat in de numerieke analyses de evenwichtsdieptes enigszins worden beïnvloed door verstoringen. In dit geval zijn de verstoringen groter dan het effect op de evenwichtsdiepte.

- Een kleinere (resp. grotere) stromingsweerstand resulteert in een kleinere (resp. grotere) evenwichtsdiepte van de nevengeul en geeft dus meer (resp. minder) sedimentatie.

Hier ontstaan ook verschillen tussen de analytische en de numerieke resultaten. Uit de analytische studie blijkt dat bij een grotere (resp. kleinere) stromingsweerstand juist een kleinere (resp. grotere) evenwichtsdiepte wordt bereikt in de nevengeul. De numerieke resultaten blijken juist het omgekeerde effect te geven. Doordat de stromingsweerstand in de analytische analyse constant is gehouden, worden hier de numerieke analyses als meer representatief beschouwd.

Nevengeulen die een sedimentverdeling hebben waarbij 'Y' relatief groot is ($Y > n$)

In de onderstaande beschrijvingen wordt er telkens aangegeven of er een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte ontstaat in de nevengeul in relatie met de parameters L_2 , B_2 en C_2 .

- Een langere (resp. kortere) nevengeullengte resulteert in een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte van de nevengeul en geeft dus meer (resp. minder) erosie.

Ook in dit geval bestaan er verschillen tussen de analytische en numerieke resultaten. In de analytische studie geeft een vergroting van de nevengeullengte een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul. Dit betekent dat er meer erosie moet optreden in de nevengeul in vergelijking tot de normale situatie. Dit blijkt in eerste instantie niet uit de numerieke analyse doordat het bodempeil, na een verloop van 80 jaar, veel hoger ligt dan in de standardsituatie. Hierdoor lijkt het alsof de nevengeul juist een lagere evenwichtsdiepte bereikt.

Doordat het verhang van de nevengeul, gecombineerd met de lengte van de nevengeul, kleiner is geworden, is het debiet naar de nevengeul sterk afgenomen. Als gevolg van de lagere stroomsnelheden verloopt de erosie zo traag, dat de nevengeul zijn grotere evenwichtsdiepte niet bereikt heeft in de numerieke analyse. Verder leidt een verkleining van de nevengeullengte tot een verkleining van de evenwichtsdiepte. Uit de numerieke analyse is dit niet heel duidelijk te zien als gevolg van (vermoedelijke) verstoringen. Wel is het bodempeil in het jaar 2040 en in het jaar 2080 van de nevengeul hoger. Hierdoor ontstaat er toch enigszins minder erosie in de nevengeul.

- Een smallere (resp. bredere) nevengeul resulteert in een grotere (resp. kleinere) evenwichtsdiepte van de nevengeul en geeft dus meer (resp. minder) erosie. Wel is het belangrijk om op te merken dat de veranderingen gering zijn. De veranderingen zijn wel iets groter dan bij sedimenterende nevengeulen ($n/3 < Y < n$).

In dit geval komen de analytische en de numerieke resultaten overeen. Zoals te zien in de bovenstaande grafiek(en) leidt een smallere nevengeul inderdaad tot een grotere evenwichtsdiepte in de nevengeul.

- Een kleinere (resp. grotere) stromingsweerstand (een grotere/kleinere Chezy coëfficiënt) geeft een kleinere (resp. grotere) evenwichtsdiepte, dus minder erosie.

Uit de numerieke analyse blijkt dit ook. Zoals te zien in de bovenstaande grafiek(en) leidt een lagere k_s -waarde tot een verlaging van de evenwichtsdiepte. In dit geval is de toename in het sedimentaanbod groter dan de toename in het debiet naar de nevengeul. Hierdoor komt het bodempeil van de nevengeul hoger te liggen ten opzichte van de referentiesituatie, waardoor dus uiteindelijk minder erosie in de nevengeul ontstaat. De redenering geldt tevens omgekeerd wanneer de stromingsweerstand in de nevengeul groter wordt.

9.5.2 Opstellen van morfologische inactieve ontwerprichtlijnen

Bij het opstellen van de onderstaande ontwerprichtlijnen wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee typen sedimentverdelingen in stabiele evenwichtssituaties ($Y > n/3$). Het is hierbij helaas nog niet goed mogelijk om karakteristieken van de nevengeulen (bijvoorbeeld aanleg in een binnen- of in een buitenbocht) onder te verdelen binnen deze twee categorieën. Dit komt omdat de kwantitatieve effecten van deze karakteristieken op de sedimentverdeling nog niet goed bekend zijn. Dit betekent dat nevengeulen die in een binnen of in een buitenbocht zijn aangelegd, beide binnen de categorie $n/3 < Y < n$ kunnen vallen. Wel kan geconcludeerd worden dat nevengeulen die in buitenbochten worden aangelegd, in vergelijking met nevengeulen die in binnenbochten worden aangelegd, een hogere waarde voor parameter ‘Y’ zullen hebben.

- Situatie waarbij parameter ‘Y’ relatief klein is [$n/3 < Y < n$] gelden de volgende ontwerpprincipes. In deze situatie wordt relatief veel sediment naar de nevengeul getransporteerd waarbij in de nevengeul hoofdzakelijk sedimentatie verwacht kan worden. Het is belangrijk om op te merken dat er ook erosie in een ongelijkwaardige nevengeul kan plaatsvinden, wanneer parameter ‘Y’ parameter ‘n’ nadert. Dit blijkt ook uit paragraaf 7.3 met figuur 33 en figuur 35 waarbij het evenwichtsbodempeil lager is dan het aangelegde bodempeil vanaf het moment waarop parameter ‘Y’ groter is dan de waarde 2.

Wanneer te veel sedimentatie in de nevengeul verwacht wordt moet de evenwichtsdiepte in de nevengeul vergroot worden. Dit kan gedaan worden door relatieve kortere nevengeulen aan te leggen. Hierdoor neemt het debiet naar de nevengeul meer toe dan de sedimentinstroom naar de nevengeul. Eventueel kan ook de stromingsweerstand verhoogd worden in de nevengeul. Hierdoor neemt de sedimentinstroom meer af dan het debiet naar de nevengeul. In beide gevallen neemt de evenwichtsdiepte in de nevengeul toe waardoor er dus minder sedimentatie plaatsvindt. Wanneer erosie in de nevengeul verwacht wordt geldt simpelweg het omgekeerde. Wel moet de daadwerkelijke sedimentverdeling binnen de randvoorwaarde van $n/3 < Y < n$ vallen.

- Een situatie waarbij parameter ‘Y’ relatief groot is [$Y > n$]. In dit geval wordt er relatief weinig sediment naar de nevengeul getransporteerd. In principe zullen ongelijkwaardige nevengeulen in deze situaties alleen maar eroderen als gevolg van de grote evenwichtsdieptes die ontstaan bij deze sedimentverdelingen. Om deze reden wordt hier alleen gesproken over hoe de evenwichtsdiepte verkleind kan worden om de erosie, indien dit niet wenselijk is, te verminderen. Bij deze

sedimentverdelingen kan dit worden bereikt door de lengte van de nevengeul te verkleinen. Dit zorgt voor een grotere toename in het sedimentaanbod dan de toename in het debiet naar de nevengeul en leidt tot een kleinere evenwichtsdiepte, waardoor de hoeveelheid erosie zal afnemen. Ook kan de lengte van de nevengeul langer worden gemaakt. Hierdoor zal de evenwichtsdiepte in de nevengeul juist toenemen. Echter omdat het verhang kleiner wordt, zal de erosie der mate traag verlopen waardoor er uiteindelijk minder erosie ontstaat. Ook een lagere stromingsweerstand bij deze sedimentverdeling geeft een verlaging van de evenwichtsdiepte in de nevengeul.

9.5.3 Conclusie ontwerprichtlijnen voor ongelijkwaardige nevengeulen

Een nevengeul kan morfologisch neutraal worden aangelegd wanneer de nevengeul wordt aangelegd op een diepte die gelijk is aan de evenwichtsdiepte voor de bedvormende omstandigheden. Bij deze evenwichtsdiepte is het sedimentaanbod gelijk aan de sedimenttransportcapaciteit van de nevengeul waardoor er in principe geen erosie of sedimentatie ontstaat, behoudens tijdelijke erosie of sedimentatie als gevolg van het dynamisch gedrag van de geul. Hierdoor kan het beheer en onderhoud aan sedimenterende nevengeulen uit het oogpunt van veiligheid, door middel van andere sedimentbeheersende maatregelen, gereduceerd worden of misschien zelfs geheel achterwege blijven.

Zo kan bij elke sedimentverdeling, wanneer deze bekend is, een evenwichtsbodempeil gerelateerd aan een evenwichtsdiepte en dus een bijhorende aanlegdiepte worden berekend. Dit bodempeil (aanlegdiepte) kan een conflict vormen met de ecologische doelstellingen doordat de nevengeul een groot deel van het jaar watervoerend moet zijn (hoewel door langs- en dwarsdifferentiatie in het dwarsprofiel veel ecologische kansen worden gecreëerd). Om deze reden is er zowel een analytische als een numerieke analyse gemaakt, om te bepalen in hoeverre de ontwerpparameters (L_2 , B_2 en C_2) van een nevengeul een verhoging (resp. verlaging) kan geven aan de evenwichtsdiepte in de nevengeul om sedimentatie (resp. erosie) te verminderen. Uit deze analyse komt naar voren dat de breedte van de nevengeul maar weinig invloed heeft op de evenwichtsdiepte. De stromingweerstand en de lengte van de nevengeulen hebben daarentegen wel een grote invloed op de evenwichtsdiepte. Uit een verdere analyse is gebleken dat effecten van de parameters L_2 en C_2 , in het verhogen of verlagen van de evenwichtsdiepte, een omslagpunt bereiken bij een sedimentverdeling waarbij $Y = n/3$. Om deze reden moet er bij het toepassen van deze morfologische neutrale ontwerprichtlijnen rekening worden gehouden met de sedimentverdeling die onderverdeeld kan worden in twee categorieën:

- $n/3 < Y < n$;
- $Y > n$.

Het is helaas niet goed mogelijk om de karakteristieken van nevengeulen (bijvoorbeeld aanleg in een binnen- of in een buitenbocht) onder te verdelen in deze twee categorieën. Dit komt omdat de kwantitatieve effecten van deze karakteristieken op de sedimentverdeling niet goed bekend zijn. Dit betekent dat nevengeulen die in een binnen- of in een buitenbocht zijn aangelegd, beide binnen de categorie $n/3 < Y < n$ kunnen vallen. Wel kan geconcludeerd worden dat nevengeulen die in de buitenbochten worden aangelegd, in vergelijking met nevengeulen die in binnenbochten worden aangelegd, een hogere waarde voor parameter 'Y' zullen hebben.

Bij sedimentverdelingen waarbij $n/3 < Y < n$ kan zowel sedimentatie of erosie optreden bij ongelijkwaardige nevengeulen, afhankelijk van de aanlegdiepte. In het geval van sedimenterende nevengeulen moet de evenwichtsdiepte in de nevengeul verhoogd worden. Deze reductie kan bereikt worden door de lengte van de nevengeul te verkleinen of door de stromingsweerstand van de nevengeul te vergroten in het ontwerp van de nevengeul. Door vegetatieontwikkeling is de stromingsweerstand niet een ontwerpparameter die constant kan worden gehouden. Ook om deze reden vormt de lengte van de nevengeul een betere parameter waarmee de evenwichtsdiepte van de nevengeul kan worden beïnvloed. In gevallen waarbij parameter 'Y' relatief hoog is, maar nog steeds binnen de categorie $n/3 < Y < n$ valt, kan erosie in de nevengeul ontstaan. Om deze erosie te reduceren moet de evenwichtsdiepte verkleind worden. Dit kan vervolgens gedaan worden door een grotere nevengeullengte of een lagere stromingsweerstand.

Aanbevolen wordt om nevengeulen in binnenbochten, in vergelijking met nevengeulen in buitenbochten, zoveel mogelijk met een kleinere nevengeullengte aan te leggen.

10 Conclusies en aanbevelingen

Een nevengeul is een rivierverruimende maatregel binnen het kader van RvdR, die steeds meer wordt toegepast in de uiterwaarden om de transportcapaciteit van het riviersysteem te vergroten. Hierbij onttrekt een nevengeul in een bepaalde verhouding een hoeveelheid water en sediment aan de rivier waardoor er een afvoer- en sedimentverdeling ontstaat op het splitsingspunt. De verhouding tussen deze verdelingen bepaalt de verdere morfologische ontwikkeling van het riviersysteem (hoofd en nevengeul). In tegenstelling tot de afvoer- en sedimentverdeling kan de sedimentverdeling nog niet goed bepaald en gereguleerd worden, met als gevolg dat rivierfuncties als veiligheid, scheepvaart en ecologie (sterk) kunnen worden beïnvloed. Wanneer een nevengeul teveel sediment onttrekt, zal de nevengeul sedimenteren. Om de transportcapaciteit van het riviersysteem te handhaven kan in de nevengeul op korte termijn grootschalig onderhoud nodig zijn.

Om deze reden is het doel van dit onderzoek om meer inzicht te verkrijgen in hoeverre ontwerpparameters van nevengeulen de morfologische ontwikkeling beïnvloeden en in hoeverre de te ontwikkelen sedimentbeheersende maatregelen, binnen het kader van veiligheid, ecologie en scheepvaart, een bijdrage kunnen leveren aan het beheer van sedimenterende nevengeulen.

10.1 Conclusies

Onderzoeksvraag 1:

Welke morfologische ontwikkelingen hebben zich tot nu toe voorgedaan in de huidige nevengeulen en in hoe kunnen deze ontwikkelingen verklaard worden met achterliggende processen?

Praktijkervaring met de morfologische ontwikkelingen van (sedimenterende) nevengeulen zijn beperkt, omdat tot op heden van de negen meestromende nevengeulen in de Rijnakkers er slechts vijf morfologisch zijn gemonitord. Er is gebleken dat alleen in de drie nevengeulen van Gameren aanzienlijke sedimentatie is opgetreden, waarbij hoofdzakelijk grof sediment (zand) op lange termijn netto wordt afgezet. Sedimentatie en erosie van fijn sediment vindt in het algemeen plaats over de gehele nevengeul. Netto sedimentatie van zwevend stof vindt voornamelijk plaats in de sedimentvang. Uit de monitoring (1996 -2002) is verder gebleken, dat de gemiddelde bodemhoogte in deze nevengeulen toeneemt met 0,08 meter per jaar.

Er treedt in een nevengeul alleen maar sedimentatie op wanneer er in verhouding meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd, dan dat de nevengeul daadwerkelijk kan transporteren. In tegenstelling tot de afvoer- en sedimentverdeling kan de sedimentverdeling (nog) niet nauwkeurig bepaald en gereguleerd worden. Wel is duidelijk dat er een onderscheid moet worden gemaakt tussen afvoercondities die lager of hoger zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed.

Tijdens afvoercondities die lager zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed, onttrekt een nevengeul in een bepaalde verhouding een hoeveelheid water en sediment aan de rivier. Door deze onttrekking ontstaat er een afvoer- en een sedimentverdeling op het splitsingspunt. De verhouding tussen deze verdelingen bepaalt hoofdzakelijk de morfologische ontwikkeling van het riviersysteem. Juist tijdens deze afvoercondities kan het grove sediment, dat via bodemtransport wordt getransporteerd, ongelijk worden verdeeld naar de afvoer- en sedimentverdeling. Dit ten gevolge van spiraalstroming, dwarsellingen en bodemvormen, die de stroming en het transport van sediment bij de bodem om en nabij het splitsingspunt sterk kunnen beïnvloeden. Merk op dat spiraalstroming zich zowel kan ontwikkelen door rivierbochteffecten als door kromming van het water, dat vanuit de rivier naar de nevengeul wordt afgebogen. Dit laatste wordt ook wel het Bulle Effect genoemd, dat een steeds grotere rol gaat spelen wanneer de nevengeul meer debiet onttrekt. Ondanks dat fijn sediment meer evenredig verdeeld wordt naar de afvoer- en sedimentverdeling, sedimenteert en erodeert dit type sediment ook als gevolg van gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit.

Tijdens afvoercondities, die hoger zijn dan de geulvullende afvoer van het zomerbed, speelt de afvoer- en sedimentverdeling op het splitsingspunt een kleinere rol. Ook tijdens deze afvoercondities kan het sedimentaanbod groter zijn dan de transportcapaciteit van de nevengeul, waarbij instroom van het sediment over de gehele lengterichting van de nevengeul kan plaatsvinden. Zo zal de transportcapaciteit van een nevengeul lager (resp. hoger) zijn, wanneer de oriëntatiehoek van de nevengeul, ten opzichte van de uiterwaardstroming groter (resp. kleiner) is. Oeverwalafzettings processen kunnen het sedimentaanbod naar de nevengeul weer verhogen.

Onderzoeksvraag 2:

In hoeverre worden de morfologische evenwichtssituaties in het watersysteem beïnvloedt door verschillende sedimentverdelingen, in relatie met de ontwerpparameters van nevengeulen?

In dit onderzoek is een splitsingspuntrelatie gebruikt, waarbij de sedimentverdeling afhankelijk is van de afvoerverdeling, in relatie tot een macht van een constante parameter 'Y'. In deze relatie zorgt een kleinere (resp. grotere) waarde voor parameter 'Y' ervoor, dat er meer (resp. minder) sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Parameter 'Y' zal kleiner worden in situaties waarbij i) de instroomopening van een nevengeul in een binnenbocht ligt (spiraalstroming), ii) bij een grotere kromming van het water naar de nevengeul (Bulle Effect) iii) niet voorzien is van een drempelconstructie (geen vrije instroom van sediment). De effecten van dwarshellingsen en bodemvormen op de sedimentverdeling zijn variabel en zijn voor langere perioden niet uit te drukken in een constante parameter 'Y'. Het sedimenttransport in het watersysteem kan worden benaderd aan de hand van een 'power-law' vergelijking. Hierbij is het sedimenttransport afhankelijk van de stroomsnelheid tot een macht van parameter 'n', die vervolgens allebei afhankelijk zijn van de afvoer in het watersysteem.

Om meer inzicht te krijgen in hoeverre het watersysteem zich morfologisch kan ontwikkelen zijn evenwichtsanalyses uitgevoerd bij verschillende (ongelijke) sedimentverdelingen met een geulvullende afvoer van het zomerbed ($n = 3,3$). Hieruit volgen regimes met betrekking tot de evenwichtsdiepteverhoudingen in het watersysteem, die kunnen worden uitgedrukt in parameters 'Y' en 'n', waarbij de sedimenttransportcapaciteit altijd gelijk is aan het sedimetaanbod.

In dit onderzoek kan worden bevestigd, gebaseerd op het onderzoek van Wang et al (1995), dat er een omslagpunt ontstaat in de evenwichtsdieptes van het watersysteem bij $Y_{crit} = n/3$. Situaties waarbij $Y > n/3$ leiden tot relatief grote evenwichtsdiepteverhoudingen in het watersysteem, waardoor de nevengeul (sterk) kan sedimenteren. Ondanks waterdiepteverstoringen, bijvoorbeeld als gevolg van (kleine) verschillen in de afvoer en sedimentverhoudingen in de tijd, leiden deze situaties ($Y > n/3$) altijd tot stabiele evenwichtssituaties. In deze situaties zullen de waterdiepteverstoringen hersteld worden, waardoor het watersysteem altijd zal terugkeren naar zijn oorspronkelijke evenwichtsdiepte. Dit in tegenstelling tot instabiele evenwichtssituaties die gevormd worden in situaties waarbij $Y < n/3$. In deze situaties worden waterdiepteverstoringen niet hersteld maar worden juist altijd versterkt. Doordat een nevengeul in deze situaties boven de evenwichtsdiepte wordt aangelegd, vormt dit al een verstoring waardoor de evenwichtsdiepteverhoudingen in zijn geheel niet bereikt zullen worden in het watersysteem. In dit geval zal de hoofdgeul altijd eroderen, totdat de nevengeul volledig dicht gesedimenteerd is.

De evenwichtsdiepteverhouding in het watersysteem wordt ook beïnvloed door de afvoerverdeling, die mede afhankelijk is van de lengte (L_2), stromingsweerstand (C_2) en van de breedte (B_2) van de nevengeul. Uit een gevoeligheidsanalyse is gebleken, dat hoofdzakelijk de lengte (L_2) en de stromingsweerstand (C_2) van de nevengeul een invloed hebben op de evenwichtsdiepte in de nevengeul. Juist in situaties waarbij $n/3 < Y < n$ resulteren langere nevengeulen met een kleinere stromingsweerstand in zeer kleine evenwichtsdieptes.

Onderzoeksvraag 3:

Hoe verloopt de morfologische ontwikkeling van nevengeulen en in hoeverre en op welke termijn (tijdschaal) kunnen deze (dicht) sedimenteren en een conflict vormen met veiligheids en ecologische doelstellingen?

Een nevengeul zal sedimenteren (eroderen) in gevallen, waarbij het evenwichtsbodempeil zich boven (resp. onder) het aanleg bodempeil bevindt. Bij sedimentatie vormt zich vanaf bovenstrooms een sedimentatiefront, dat zich in de tijd stroomafwaarts zal bewegen en in hoogte zal toenemen. Wanneer het bodempeil het evenwichtsbodempeil nadert, zal de in- en uitstroom van sediment steeds dichterbij elkaar komen te liggen en hierdoor zal de morfologische ontwikkeling van de nevengeul steeds trager verlopen. Zeer kleine evenwichtsdieptes in de nevengeul zullen niet bereikt worden, omdat de nevengeul zichzelf afknijpt van de rivier.

De termijnen waarin nevengeulen zich morfologisch kunnen ontwikkelen, kunnen aan de hand van dit onderzoek nog steeds slechts benaderend en beschreven worden, middels een aantal veronderstellingen (paragraaf 7.4). Hiertoe is er in het 1D Rijntakken model één fictieve nevengeul, zonder regulerende

constructies, geschematiseerd in de Waal, die geometrisch (C_2 , B_2 en L_2) representatief zijn voor hoe nevengeulen momenteel in de praktijk worden aangelegd. Met een hydrograaf van 80 jaar blijkt de overgang tussen stabiele en instabiele evenwichtssituaties zich min of meer te vormen, bij een waarde van 3,3 voor parameter 'n', waardoor Y_{crit} gelijk is aan 1,1.

Uit numerieke simulaties is gebleken dat instabiele situaties ($Y < 1,1$) altijd leiden tot volledige sedimentatie van de nevengeul binnen een termijn van 10 jaar. Omdat bestaande nevengeulen nog steeds niet dicht gesedimenteerd zijn, wordt blijkbaar tot op heden de sedimentinstroom voldoende gereduceerd door de wijze waarop deze nevengeulen zijn aangelegd. Zo kunnen ook de sedimentatiesnelheden in Gameren (0,08 m/j) min of meer vertaald worden naar een sedimentverdeling met een Y-waarde die gelijk is aan 1,4, hetgeen dus een stabiele evenwichtssituatie vormt. Volgens Kleinhans (2008) is parameter 'Y' niet constant, waardoor het mogelijk is dat instabiele situaties weer stabiel kunnen worden. Dit omdat door sterke sedimentatie de nevengeul steeds minder debiet onttrekt aan het watersysteem, waardoor vervolgens ook minder sedimenttransport naar de nevengeul optreedt. Of dit verschijnsel vertaald kan worden naar een hogere Y-waarde is afhankelijk van de verhouding waarin het sedimenttransport en de afvoer naar de nevengeul daadwerkelijk afneemt en kan op basis van de huidige kennis nog niet bepaald worden.

Bij situaties waarbij $Y > n/3$ worden stabiele evenwichtssituaties gevormd, waarbij binnen een periode van 80 jaar al dan niet een evenwichtsdiepte wordt benaderd. In de praktijk ontstaat er slechts sedimentatie in de nevengeul, zoals deze is gedefinieerd in dit onderzoek met een bovenstroomse bodemligging van 0,4 m+NAP, bij situaties waarbij $1,1 < Y < 2,5$. In dit onderzoek is verondersteld, dat wanneer 10 procent van het doorstroom oppervlak bovenstrooms van de nevengeul dicht gesedimenteerd is, er vanuit het oogpunt van veiligheid moet worden ingegrepen bij een bodemligging van 1,5 m+NAP. Rivierbeheerders kunnen vervolgens bij situaties waarbij $1,1 < Y \leq 1,8$ een onderhoudstermijn verwachten van 6 á 70 jaar. Bij situaties waarbij $Y > 1,8$ zal de bodemligging van 1,5 m+NAP in de nevengeul niet bereikt worden. Indien cyclisch beheer op een termijn van 30 jaar wordt gehanteerd, dan zullen situaties waarbij $Y < 1,6$ een conflict vormen tussen veiligheid en ecologische doelstellingen, met betrekking tot het onderhoud van de nevengeulen.

Onderzoeksvraag 4:

Welke sedimentbeheersende maatregelen (tijdelijk, permanent en ontwerptechnisch) kunnen naast sedimentvangen en baggeren worden ontwikkeld en toegepast worden bij sedimenterende nevengeulen?

De morfologische ontwikkeling van een nevengeul kan beïnvloed worden door de evenwichtsdiepte tijdelijk of permanent te vergroten, door de instroom van het sediment naar de nevengeul te reduceren en/of de transportcapaciteit van de nevengeul te verhogen. Dit laatste kan gedaan worden door het debiet naar de nevengeul te vergroten of door het dwarsprofiel van de nevengeul te verkleinen. Op basis van deze (uitgangspunten) zijn er sedimentbeheersende maatregelen ontwikkeld, uiteenlopend van sedimentreducerende, dwarsprofiel- en debietregulerende maatregelen.

Sedimentreducerende maatregelen zijn tijdelijke of permanente maatregelen die bovenstrooms (kribvak en of kribkop) in de nevengeul worden toegepast om het sediment, dat via bodemtransport naar de nevengeul wordt getransporteerd, te reduceren. De verwachting is dat een luifelconstructie de instroom van het sediment naar de nevengeul effectiever kan reduceren dan drempelconstructies, gezien het feit dat nevengeulen een groot deel van het jaar watervoerend moeten zijn. Om deze reden is de dwarshelling (afhankelijk van de hoogte) van de drempelconstructie, die het sediment via bodemtransport tegenwerkt maar beperkt realiseerbaar. De sedimentreductie van 'bandalls', bodem- en drijvende schermen zijn afhankelijk van de waterdiepte en zullen zonder extra inspanningen niet altijd optimaal functioneren bij een variërend waterpeil in de rivier (Ankum & Brouwer, 1993). De overige maatregelen zijn grootschaliger, waardoor er eerder conflicten kunnen ontstaan met de scheepvaart.

Dwarsprofiel regulerende maatregelen zijn tijdelijke maatregelen die het dwarsprofiel van de nevengeul verkleinen. Maatregelen zoals schanskorven of caissons versterken, naast lokale erosie, de sedimentatie in de nevengeul als gevolg van een hoge stromingsweerstand. Het plaatsen van bandall's in de nevengeul kunnen wellicht een vertraging geven, als gevolg van het opnieuw herprofilen van het dwarsprofiel. Echter naast het feit dat deze maatregelen veel inspanningen vergen, is de verwachting dat sedimentreducerende maatregelen effectiever zullen zijn.

Debietregulerende maatregelen zijn permanente maatregelen die in de hoofdgeul worden toegepast, waarmee door middel van een (lokale) waterpeilverhoging, het debiet naar de nevengeul kan worden vergroot. Naast de vergroting van het debiet, zal het sedimenttransport naar de nevengeul ook toenemen. Dit laatste zal bij het aanleggen van een langsdam minder sterk zijn dan bij een bodemdrempel of bij een dwarsprofielversmalling in de hoofdgeul, doordat het water naar de langsdam minder sterk hoeft te worden afgebogen (Bulle Effect en geen neervorming). Ook zal de langseul deels als een sedimentvang kunnen fungeren, doordat de stroomsnelheden worden verlaagd. Daarnaast kan een langsdam een verbetering teweeg brengen aan de ecologische ontwikkeling van oevers in de uiterwaarden en autonome bodemdaling in de rivier beperken als gevolg van (lichte) sedimentatie in de hoofdgeul.

Het debiet naar de nevengeul kan ook tijdelijk gereguleerd worden door middel van pompen, door de nevengeul bovenstrooms af te sluiten met een constructie. Hiermee kan de instroom van sediment sterk gereduceerd worden door sedimentarm water uit de hoofdgeul te onttrekken. Op deze manier kan effectief erosie in de nevengeul gerealiseerd worden met debietcapaciteiten, die ook onder normale omstandigheden naar de nevengeul worden getransporteerd. Daarnaast is het de bedoeling om deze pompen op een baggerschuit te plaatsen, waardoor deze maatregel (flexibel) verplaatst kan worden en dus ingezet kan worden bij meerdere sedimenterende nevengeulen.

Naast bovenstaande constructieve maatregelen, kan de oplossing ook gezocht worden in het ontwerp van de nevengeul (C_2 , B_2 en L_2). Bij de huidige ontwerpaanpak wordt de bodemligging van de nevengeul bepaald op hydraulische en ecologische gronden. Op deze manier wordt het sedimenteren of eroderen van de nevengeul al indirect opgelegd wanneer deze, bij een zekere afvoer- en sedimentverdeling, van zijn evenwichtsdiepte wordt aangelegd. Door middel van de morfologische ‘neutrale’ ontwerprichtlijnen kan de evenwichtsdiepte zo aangepast worden dat deze diepte min of meer overeenkomt met de gewenste bodemligging. Hiermee kan het beheer en onderhoud van sedimenterende nevengeulen uit het oogpunt van veiligheid, door middel van andere sedimentbeheersende maatregelen, gereduceerd of misschien zelfs wel voorkomen worden. Bovendien kunnen hogere stroomsnelheden worden toegelaten, waardoor de nevengeul in horizontale zin morfologisch actief (of actiever) kan zijn.

Onderzoeksvraag 5:

In hoeverre leveren de sedimentbeheersende maatregelen (tijdelijk, permanent en ontwerptechnisch) een bijdrage aan het beheer en onderhoud van sedimenterende nevengeulen?

Met maatregelen kan slechts erosie gerealiseerd worden wanneer:

- de instroom van sediment naar de nevengeul kleiner is dan de uitstroom van sediment;
- voor uitstroom van sediment moet de stroomsnelheid gemiddeld groter zijn 0,3 m/s voor een zandige bodem, terwijl naarmate de nevengeul meer sedimentatie plaatsvindt:
 - § stroomvoerendheid en de debietonttrekking van de nevengeul afneemt;
 - § een steeds groter debiet benodigd is om sedimenttransporterende stroomsnelheden te creëren in de nevengeul, omdat doorstroombreedte van de nevengeul steeds breder wordt.

In relatie met bovenstaande kan met tijdelijke sedimentreducerende maatregelen alleen erosie worden gerealiseerd, wanneer deze een sterke reductie leveren in de sedimentinstroom naar de nevengeul en vroegtijdig worden ingezet. Doordat deze periodieke mitigerende maatregelen zo vroegtijdig moeten worden aangelegd, ligt het wellicht meer voor de hand deze maatregelen permanent toe te passen, die vanaf het begin werkzaam zijn en de ontwikkeling van de nevengeul vertragen. Op deze manier kan de morfologische ontwikkeling in een sedimenterende nevengeul, waarbij gemiddeld 0,08 m/j sedimentatie optreedt, met 5 tot 80 jaar vertraagd worden, indien de sedimentinstroom met circa 40 á 80 procent kan worden gereduceerd. Vanwege deze positieve uitkomsten is het zinvol om nader onderzoek te doen in 3D model studies, om te bepalen of deze potentiële reducties in het sediment ook daadwerkelijk behaald kunnen worden met deze maatregelen.

Baggerpompen kunnen als tijdelijke maatregelen al vanaf een capaciteit van 10 m³/s erosie in de nevengeul realiseren. Toch duurt het in deze simulaties nog steeds circa 2 jaar om de sedimentatie van een 0,5 meter door te spoelen tot aan de oorspronkelijke aanlegdiepte van de nevengeul. In de praktijk kan men de

nevengeul vanuit benedenstrooms door 'flushen' en de pomp tijdens het 'flushen' verplaatsen, waardoor het sediment niet door de gehele nevengeul getransporteerd hoeft te worden. Deze effecten kunnen niet eenvoudig gemodelleerd worden in een 1D model. De verwachting is wel dat op deze manier de inzet van de maatregel sterk gereduceerd kan worden. Echter een pompcapaciteit van meer dan $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kan slechts bereikt worden met pompen die doorgaans op baggerschuiten of in gemalen worden toegepast, waarvan de investeringskosten hoog zullen zijn, niet energiezuinig en derhalve niet haalbaar kunnen zijn.

Andere maatregelen die permanent kunnen worden ingezet zijn (lokale) waterpeilverhogingen, waardoor het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul zal toenemen. Hierbij zal naar verwachting met een langsdam het grootste effect op de ontwikkeling van een nevengeul behaald kunnen worden (zie onderzoeksvraag 4). In een situatie ($Y = 1,4$) zonder waterpeilverhoging ontstaat er sedimentatie van 1 meter. In dezelfde simulatie ($Y = 1,4$) met een waterpeilverhoging die varieert van 0,05 tot 0,25 meter over een periode van 8 jaar ontstaat erosie in de nevengeul van 0,3 meter. Merk op dat het sedimenttransport in de laatste situatie wel is toegenomen als gevolg van veranderingen in de afvoerverdeling. De vraag blijft of de daadwerkelijke sedimentverdeling op deze manier goed gesimuleerd wordt en of deze waterpeilverhogingen (continu) bereikt kunnen worden met een langsdam.

Een andere oplossing kan zijn, wanneer de sedimentverdeling na enige tijd bekend is, om door middel van de morfologische 'neutrale' ontwerprichtlijnen, de evenwichtsdiepte zo aan te passen dat deze diepte min of meer overeenkomt met de gewenste aanleg bodemhoogte vanuit hydraulische en ecologische gronden. Om deze reden is er in dit onderzoek onderzocht in hoeverre de geometrieparameters (C_2 , B_2 en L_2) de evenwichtsdiepte beïnvloeden, zodat de aanlegbodemhoogte overeenkomt met het gewenste bodempeil. In stabiele evenwichtssituaties waarbij $Y > n/3$ kan een lager evenwichtsbodempeil, gerelateerd aan een grotere evenwichtsdiepte, verkregen worden door:

- de lengte van de nevengeul te verkleinen (groter verhang);
- de stromingsweerstand van de nevengeul te vergroten.

Merk op dat deze 'neutrale' ontwerpprincipes alleen kunnen worden toegepast in stabiele evenwichtssituaties. In instabiele evenwichtssituaties ($Y < n/3$) zijn de evenwichtsdieptes in de nevengeul te groot en hebben de geometrieparameters (L_2 en B_2) te weinig effect om de evenwichtsdieptes juist te verkleinen. In dit geval zal de nevengeul altijd volledig dicht sedimenteren.

10.2 Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek volgen er 3 aanbevelingen:

1. *Monitoren van de sedimentverdeling (tussen hoofd- en nevengeul), bij een sedimenterende solitaire nevengeul, bij verschillende afvoerverdelingen (tussen hoofd- en nevengeul) en dit te continueren tijdens de verdere morfologische ontwikkeling van de nevengeul.*

De achterliggende gedachte van deze aanbeveling is om een startwaarde voor parameter 'Y' te bepalen. Aan de hand van de monitoring gegevens kan deze afgeleid worden uit appendix L. In dit onderzoek zijn de morfologische ontwikkelingen van een nevengeul, die zich in de praktijk kunnen voordoen, gerelateerd aan een zekere sedimentverdeling die wordt bepaald door de afvoerverdeling tot een macht van parameter 'Y'. De sedimentverdeling (met name parameter 'Y') bepaalt echter wel of de nevengeul op korte termijn (b.v. 10 jaar) volledig dicht zal sedimenteren of dat er op langere termijn een zekere evenwichtsdiepte zal worden bereikt. Tot op heden kan worden vastgesteld, dat de bestaande nevengeulen binnen een termijn van 10 jaar niet volledig dicht gesedimenteerd zijn en dus kan worden geconcludeerd dat instabiele situaties zich nog niet hebben voorgedaan. Door de wijze waarop nevengeulen in het verleden zijn aangelegd, is de sedimentinstroom naar de nevengeul laag genoeg en volgt hieruit dat parameter 'Y' groter is dan $n/3$.

Daarnaast is de vraag in welke mate de sedimentsverdeling kan veranderen in verloop van tijd. Zoals beschreven door Kleinhans (2008) is de sedimentverdeling (parameter 'Y') in werkelijkheid

niet constant, waardoor het mogelijk is dat de evenwichtsituatie in het watersysteem van instabiel naar stabiel gaat. Dit komt omdat door sedimentatie zowel het debiet als de sedimentinstroom naar de nevengeul afneemt. Dit verschijnsel zit ook in de splitsingspuntrelatie. In de praktijk kan deze afname echter groter of kleiner zijn. De verhouding waarin het sedimentaanbod naar de nevengeul toe- of afneemt in relatie met de afvoerverdeling bepaald dus of stabiele situaties kunnen overgaan naar instabiele situaties of net andersom. Dit zou op basis van de monitoring gegevens ook afgeleid kunnen worden uit Appendix L.

Doordat het onzeker is in hoeverre sedimenterende nevengeulen verwijderd zijn van een instabiele situatie, wordt aanbevolen om eerst meer monitoring uit te voeren bij solitair sedimenterende nevengeulen. Wanneer hieruit blijkt dat een nevengeul zich in of nabij een instabiele situatie bevindt, wordt er aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de daadwerkelijke sedimentreductie van sedimentreducerende maatregelen zoals luifelconstructies, bodemschermen en drijvende schermen (bandall's).

Wanneer blijkt dat de sedimentinstroom zich relatief ver van een instabiele situatie bevindt, wordt er aanbevolen om nevengeulen aan te leggen volgens de neutrale morfologische ontwerprichtlijnen.

2. *Het aanleggen van een nevengeul in een binnenbocht zonder drempel- of andere regulerende constructies.*

Als alternatief voor de eerste aanbeveling om meer en langer te monitoren kan ook gedacht worden aan een scenario waarin een nevengeul zo wordt aangelegd, dat een instabiele situatie verwacht kan worden. Als vervolgens blijkt dat de nevengeul niet volledig dicht sedimenteert, dan is het zeker dat ook alle andere nevengeulen zich altijd in een stabiele situatie zullen bevinden.

3. Onderzoek naar een fysische betere splitsingspunt relatie die verschillende fysische processen beter in rekening brengt. Zo kunnen de effecten van dwarshellingen en bodemvormen, die variëren over de tijd, niet goed meegenomen worden in de splitsingspunt relatie van Wang et al (1995), waarbij de sedimentverdeling afhankelijk is van de afvoerverdeling tot een macht van een constante parameter 'Y'. Zo kan bijvoorbeeld de nieuwe splitsingspunt relatie van Kleinhans (2008) gebruikt worden voor validatie van de morfologische ontwikkelingen van het watersysteem die in dit onderzoek zijn verkregen met de splitsingspunt relatie van Wang et al (1995).

Referenties

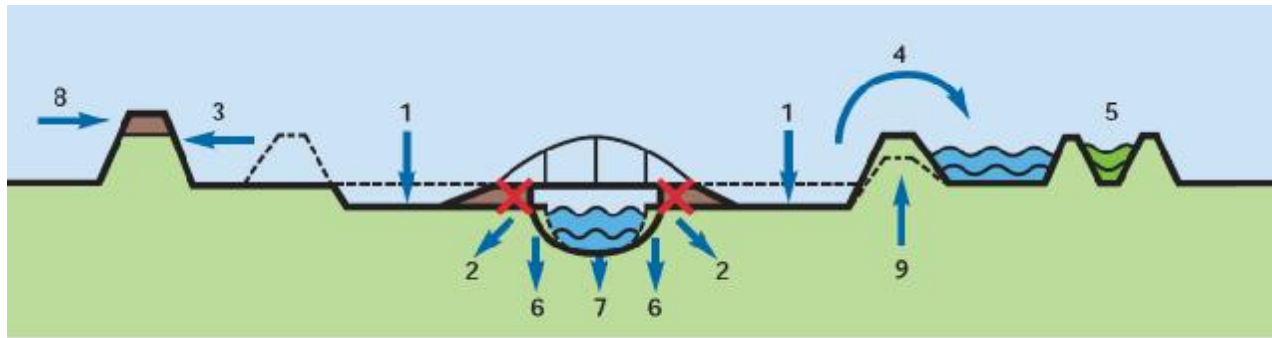
- Ankum, P & Brouwer, R. (1993). *Nevengeulen en sedimentverdeling*. Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Baptist, M.J. & Mosselman, E. (2002). *Biogeomorphological modelling of secondary channels in the Waal river, Delft Cluster programme*. WL | Delft Hydraulics.
- Boven-Rijn/Waal Maatregelenboek: *Een overzicht van mogelijke rivierverruimende maatregelen in het stroomgebied*. (2003). RIZA, RIZA rapport: 2003.022.
- Breen, L & Havinga, H. (2003). *Rivierkundige aspecten van nevengeulen in de uiterwaard*. Directoraat-Generaal Rijskwaterstaat, Directie Oost Nederland, Arnhem.
- Chaychuk, D. (2005). *The use of gabions and reno mattresses in river and stream rehabilitation*. Regional Conference, Port Macquarie, NSW.
- Deltacommissie (2008) Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst.
- Dienst Landelijk Gebied regio Zuid. (2007). Zandmaas II Thema-uitwerking Grondstromen.
- Duel, H., Baptist, M.J. & Penning, W.E. (2001). *Cyclic Floodplain Rejuvenation: a new strategy base don floodplain measures for both flood risk manegement and enhancement of the biodiversity of the river Rhine*, main report CFR project. Ministry of Transport, Public Works and Water management.
- Ghimire, B. (2003). *No-regret solutions for intakes for secondary channels*. UNESCO-IHE, Delft, Nederland.
- Heer, A.F.M. (2003). *Afstudeerrapport: Sedimentverdeling bij riviersplitsingen*. Technische Universiteit Delft
- Ijssel Maatregelenboek: *Een overzicht van mogelijke rivierverruimende maatregelen in het stroomgebied*. (2003). RIZA, RIZA rapport: 2003.020.
- Jans, L. (2000). *Monitoring nevengeulen: integrale jaarrapportage 1998/1999*. RIZA, RIZA Werkdocument 2000.034X .
- Jans, L. (2004). *Evaluatie nevengeulen Gamerensche Waard 1996-2002*. RIZA, RIZA rapport 2004.24.
- Kleinhans, M.G., Jagers, H.R.H., Mosselman, E. & Sloff, C.J. (2008). *Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models*. Water Resources Research, Vol. 44.
- Mark, van der C.F. (2004). *Afstudeerrapport: sedimentverdeling bij splitsingspunten*. Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft
- Milieueffectrapport ruimte voor de rivier (2005):
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007). *Leidraad Rivieren*. Ando Bv, Den Haag
- Molenaar, de J.G. (2005). *Ecologische relaties tussen het IJmeer en zijn omgeving: een verkenning van de mogelijkheden en perspectieven voor compensatie van aantasting van het IJmeer*. Alterra-rapport 1235, Wageningen.
- Mosselman, E. (2001). *Morphological development of side channels*. CFR project 9, IRMA-SPONGE and Delft Cluster.
- Peters, B.W.E., Kater, E & Geerling, G. W. (2006). *Cyclisch beheer in uiterwaarden: Natuur en veiligheid in de praktijk*. Centrum voor Water en Samenleving, Radboud Universiteit, Nijmegen.

- Peters, B. (2006). *Ecologisch herstel en inrichting projecten maasdal: Inventarisatie van kansrijke en geplande projecten en maatregelen*. Rijkswaterstaat
- Ribberink, J.S. & Hulscher, S.J.M.H. (2006). *Shallow-Water flows*. Civiele Techniek en Management [CIT], Universiteit Twente.
- Ribberink, J.S. (2006). *Transport Processes and Morphology*. Civiele Techniek en Management [CIT], Universiteit Twente.
- RIZA (1996). *Ontwerp nevengeul Gameren: Natuurontwikkelingsproject Gamerensche Waarden Eindrapportage*. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- RIZA (2005). *Technical Reference: Morphology and Sediment Transport*. SOBEK-RE Help Desk.
- Tollenaar, K. (2002). *Afstudeerrapport: morfologische effecten door klimaatverandering bij het toepassen van Ruimte voor Rijntakken maatregelen*. Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen, Technische Universiteit Delft
- Tönis, R & Taal, M. (2008). *Leidraad Bepaling Morfologische Effecten van Ruimte voor de Rivier Projecten*. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. Directie Oost Nederland, Arnhem.
- Rivierkundig beoordelingskader voor ingrepen in de Grote Rivieren versie 2,0 (2008). Rijkswaterstaat en Waterdienst
- Rozovskij, I.L. (1957). *Flow of water in bends of open channels*. Kiev: Acad. Sci. Ukrainian SSR.
- Schielen, R.M.J., Jesse, P. & Bolwidt, L.J. (2007). *On the use of flexible spillways to control the discharge ratio of the Rhine in the Netherlands: hydraulic and morphological observations*. Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw | 86 – 1 | 77 - 88 |.
- Simons, J., Bakker, C. & Sorber, A. (2000). *Evaluatie nevengeulen Opijnen en Beneden Leeuwen 1993 - 1998*. RIZA rapport 2000.040
- Wang, Z.B., Fokink, R.J., Vries, M. de, Langerak, A. (1995), Stability of riverbifurcations in 1D morphodynamic models. Journal of Hydraulic Research, IAHR, vol. 33, no. 6, 739-750
- Wolters, H.A., Platteeuw, M. & Schoor, M.M. (2001). *Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden: ecologie en veiligheid gecombineerd*. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA rapport: 2001.059

Internetbronnen

- Ruimte voor de rivier
[laatst bezocht op 26 september 2008]
<http://www.ruimtevoordrivier.nl/Waalbochten/menu/Het%20project/Veelgestelde%20vragen#vraag%201>
- Ministerie verkeer en waterstaat (2004). Persbericht: Pompcapaciteit gemaal IJmuiden
[laatst bezocht op 15 april 2004]
www.verkeerenwaterstaat.nl/actueel/nieuws/nieuwsarchief/Pompcapaciteit_gemaal_IJmuiden_vergroot.aspx
- Waterschap Rijn en IJssel (2009). Persbericht: Pompcapaciteit gemaal Kandia
[laatst bezocht op 15 april 2004]
<http://www.wrij.nl/actueel/persberichten?ActItnIdt=123594>

Appendix A: Overzichtlijst RvdR maatregelen



- | | | | |
|---|----------------------|---|--------------------|
| 1 | Uiterwaardvergraving | 6 | Kribverlaging |
| 2 | Obstakelverwijdering | 7 | Zomerbedverdieping |
| 3 | Dijkverlegging | 8 | Dijkoverhoogte |
| 4 | Retentie en berging | 9 | Dijkverbetering |
| 5 | Hoogwatergeul | | |

figuur 55: Type maatregelen die binnen het kader Ruimte voor de Rivier genomen kunnen worden. Bron: Overgenomen uit Milieueffectrapport ruimte voor de rivier (2005).

Hieronder worden de definities weergegeven zoals geciteerd in de Milieueffectrapport ruimte voor de rivier (2005):

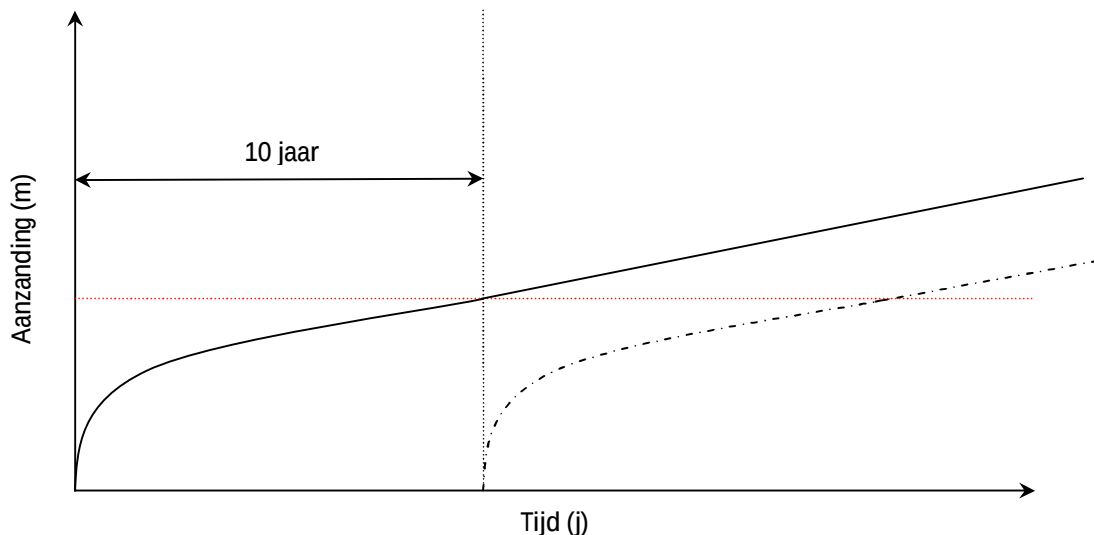
- 1) *Vergraving van de uiterwaarden*: de uiterwaarden zijn in de loop der eeuwen door opslibbing steeds hoger komen te liggen. Door het afgraven van de kleilaag en eventueel van de onderliggende zandlagen kunnen die uiterwaarden verlaagd worden.
- 2) *Verwijderen van obstakels in het winterbed*: pijlers van (spoor)bruggen en wegen, hoogwatervrije terreinen en veerstoepen in de uiterwaarden stuwen het water op. Door obstakels te verwijderen of aan te passen, wordt het water sneller afgevoerd.
- 3) *Uiterwaardverbreding door dijkverleggingen en ontpolderingen*: door dijken landinwaarts te verleggen worden de uiterwaarden breder en krijgt de rivier meer ruimte. Een polder die hierdoor buitendijks komt te liggen is ontpolderd.
- 4) *Retentie en berging*: retentiegebieden zijn bedijkte gebieden, waarin tijdelijk water kan worden opgevangen. Berging is ook mogelijk op oppervlaktewater, bijvoorbeeld het Volkerak-Zoommeer.
- 5) *Hoogwatergeulen*: hoogwatergeulen zijn bedijkte gebieden die aftakken van een rivier om deel van het water via een andere route af te voeren.
- 6) *Kribverlaging*: kribben zijn bedoeld om de vaargeul vast te leggen en op diepte te houden. Door de uitschuring van het zomerbed heeft de bovenkant van de kribben voor een deel zijn functie verloren, terwijl zij wel een opstuwende werking hebben. Dit effect kan worden verminderd door de kribben waar mogelijk gedeeltelijk te verlagen.
- 7) *Zomerbedverdieping*: verdieping van het zomerbed kan de afvoercapaciteit van de rivier vergroten.
- 8 & 9) *Dijkverbetering*: met het verhogen of versterken van dijken wordt overstrooming voorkomen.

Appendix B: Tijdschaal cyclisch beheer

Hier wordt een fictieve schematisatie weergegeven van de onderhoudstijdschalen uit het oogpunt van veiligheid en ecologie. Uit deze schematisatie is duidelijk te zien dat de onderhoudstermijnen van veiligheid en ecologie niet parallel aan elkaar gelijk lopen en dus een potentieel conflict met elkaar kunnen vormen.

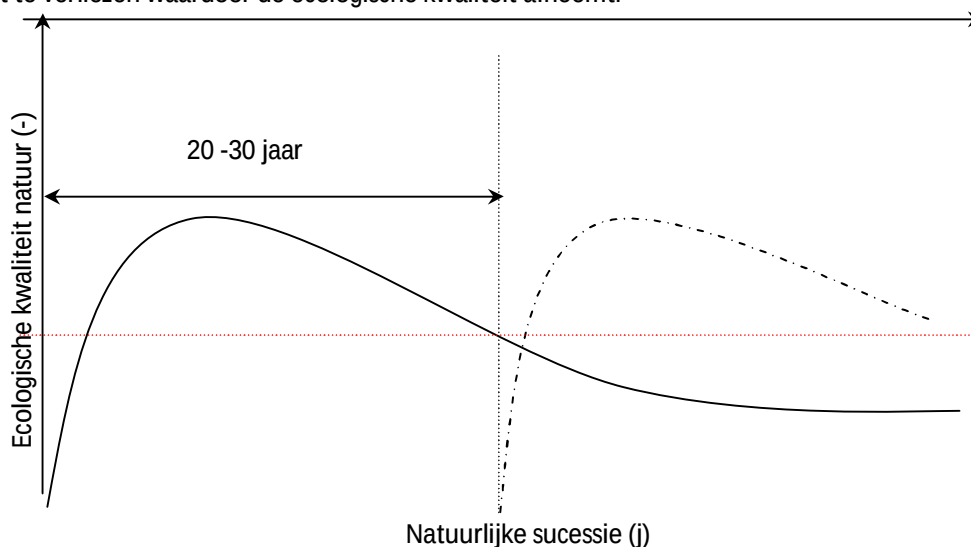
Veiligheid

Hier wordt een voorbeeld gegeven van een onderhoudstermijn van 10 jaar die noodzakelijk is vanuit het oogpunt van de veiligheid met betrekking tot sedimentatie van de nevengeul. De rode lijn geeft het kritische bodempeil van de nevengeul weer, die in de praktijk bereikt mag worden, in relatie met de benodigde afvoercapaciteit tot het reduceren van de maatgevende hoogwaterstanden (MHW) in een rivier.



Ecologie

Hier is voorbeeld gegeven van een onderhoudstermijn (25-100 jaar) die wenselijk kan zijn vanuit het oogpunt van de ecologie in combinatie met cyclisch beheer. De rode lijn geeft aan tot wanneer nog voldoende variatie aanwezig is in het aantal natuurtypen (aantal pioniervegetatie). Vanaf tijdstip nul zijn er nog geen pionier vegetaties maar deze zullen vrij snel volgen. Vervolgens is er een maximum bereikt in het aantal natuurtypen. Hierbij is een goede afwisseling tussen pioniervegetaties en vegetatie die zich verder is in de natuurlijke successie bevinden. In een nog later stadium zijn er geen tot weinig pioniervegetaties en de natuur begint zijn diversiteit te verliezen waardoor de ecologische kwaliteit afneemt.



Appendix C: Overzichtlijst Toekomstige Nevengeulen

Neuvengeul	Positie	Plaats	Hoofd-rivier	Lengte (km)	Stroming	Frequentie (dgn/jr)	Constructie	Zandvang	Aanzandingsgebied	Wanneer aangelegd
<i>Opijnen</i>	buitenbocht	Opijnen	Waal	≈1	vrijwel permanent	> 180	drempel	Nee	"-"	1994
<i>Beneden Leeuwen</i>	recht	Beneden-Leeuwen	Waal	≈2	vrijwel permanent	> 180	duiker	Ja	"-"	1997
<i>Gamersche Waard grote</i>	recht / buitenbocht	Gameren	Waal	2	permanent	365	drempel??	Ja	Ja	1999
<i>Gamersche Waard oost</i>	recht / buitenbocht	Gameren	Waal	0,5	periodiek	129	drempel	Nee	Ja	1996
<i>Gamersche Waard West</i>	recht / buitenbocht	Gameren	Waal	1	vrijwel permanent	329	drempel	Nee	Ja	1996
<i>Bakenhof</i>	binnenbocht / recht	Arnhem	Rijn	≈1	permanent	365	duiker	Nee	"-"	2002
<i>Klompewaard bin</i>	buitenbocht	Pannerden	Waal	"-"	permanent	"-"	drempel	Nee	"-"	1999
<i>Klompewaard bui</i>	buitenbocht	Pannerden	Waal	"-"	periodiek	"-"	"."	Nee	"-"	2000
<i>Vreugderijkerwaard</i>	binnenbocht / recht	Zwolle	IJssel	"-"	permanent	"-"	duikers	ja	"-"	2002

<i>Neuvelgeul</i>	<i>Rivier</i>	<i>Type</i>	<i>Plaats</i>	<i>Traject</i>	<i>Rivier km</i>	<i>Realisatie</i>
<i>Nevengeul Eijsden</i>	Maas	nevengeul	Caestert Beemden bij Eijsden	Boven Maas	2,2-4,6	2015
<i>Nevengeul Kleine weerd</i>	Maas	nevengeul	Natuurgebied Kleine Weerd bij Maastricht	Boven Maas	7,3-12	2009/2015
<i>Hoogwatergeul ten oosten van Borgharen en Itteren</i>	Maas	hoogwatergeul	Neerharen	Grens Maas	18,5-21,0	2015
<i>Hoogwatergeul Kokkelert</i>	Maas	hoogwatergeul	Kokkelert-Roosteren	Grens Maas	51,1-54,3	2021
<i>Hoogwatergeul Oude Maas</i>	Maas	hoogwatergeul	Aasterberg	Grens Maas	55	2021
<i>Hoogwatergeul Koningssteen</i>	Maas	hoogwatergeul	Thorn	Grens Maas	66	2021
<i>Nevengeul bij stuw Linne</i>	Maas	nevengeul	Osen	Zand Maas	68,4	2021
<i>Nevengeul Isabellagreend</i>	Maas	nevengeul	Merum	Zand Maas	73	2021
<i>nevengeul stadswijde roermond</i>	Maas	permanent stromend	Roermond	Zand Maas	80,4-85	2015
<i>Nevengeul Rijkkel</i>	Maas	nevengeul	Rijkkel	Zand Maas	89-91	2015
<i>Hoogwatergeul / nevengeul Weerbeemden</i>	Maas	(hoogwater) nevengeul	Neer-Kesseleik	Zand Maas	91,5-92,8	2021
<i>Hoogwatergeul De Weerd / Reuver</i>	Maas	hoogwatergeul	De weerd, Reuver	Zand Maas	95,6-96,7	2027
<i>Nevengeul Baarlo</i>	Maas	permanent stromend	Baarlo	Zand Maas	99,5-103	2015/2021
<i>Hoogwatergeul Baarlo</i>	Maas	hoogwatergeul	Baarlo	Zand Maas	103-104	2021
<i>Hoogwatergeul en weerdverlaging Raaiweide</i>	Maas	hoogwatergeul	Venlo	Zand Maas	107,8-109,1	2015
<i>hoogwatergeul Venlo-Velden</i>	Maas	hoogwatergeul	Venlo	Zand Maas	109-113,6	2015
<i>Geulvormige laagte Grubbenvorst</i>	Maas	"_"	"_"	Zand Maas	113,5-116,1	"_"
<i>Nevelgeul Aastbreuk</i>	Maas	"_"	"_"	Zand Maas	118,8-121	"_"
<i>Hoogwatergeul Broekhuizervorst</i>	Maas	"_"	"_"	Zand Maas	123-133	"_"
<i>Hoogwatergeul Aijen Bergen (Wanssum)</i>	Maas	Hoogwatergeul	Wanssum	Maas	139,9-142,5	2015
<i>Hoogwatergeul Groeningen-Sambeek</i>	Maas	hoogwatergeul	Vielingsbeek	Zand Maas	140,9-147,3	2021
<i>Nevengeul Diekendaal (Afferden)</i>	Maas	nevengeul	Afferden	Zand Maas	145,1-151,2	2015
<i>Hoogwatergeul Meerkampen</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	2015
<i>Nevengeul Keent</i>	Maas	"_"	"_"	Bedijkte Maas	176,4-181,1	"_"
<i>Hoogwatergeul Batenburg (Liendenschewaard)</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	"_"
<i>Hoogwatergeul Diedense uiterdijk</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	"_"
<i>Nevengeul Goeden Ham</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	"_"
<i>Hoogwatergeul Macharensche Waarden en Ossekamp</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	"_"
<i>Hoogwatergeul Hemelrijkse Waard</i>	Maas	"_"	"_"	Maas	"_"	"_"

<i>Neuvelgeul</i>	<i>Rivier</i>
<i>Bemmelerwaard</i>	Waal
<i>Oosterhoutse weilanden</i>	Waal
<i>Moespotsche waard</i>	Waal
<i>Winssensewaard</i>	Waal
<i>Drutensche Waarden oost</i>	Waal
<i>Stiftsewaard</i>	Waal
<i>Rijswaard</i>	Waal
<i>Rijswaard en Kerkenwaard</i>	Waal
<i>Crobsche waard</i>	Waal
<i>Herwijnsche bovenwaard</i>	Waal
<i>Brakelsche Benedenwaarden</i>	Waal
<i>Millingerwaard</i>	Waal
<i>Dalemschewaard</i>	Waal
<i>Hoogwatergeul Veessen en Wapenveld</i>	IJssel
<i>Stokebrandsweerd</i>	IJssel
<i>Welsommerwaard</i>	IJssel
<i>Fontmonderwaard</i>	IJssel
<i>Keizers en stobben Waarden</i>	IJssel
<i>Ossenwaard</i>	IJssel
<i>Schelle en Oldeneler buitenwaarden</i>	IJssel
<i>Hoogwatergeul Kampen</i>	IJssel
<i>Duursche Waarden</i>	IJssel

Uit:

IJssel Maatregelenboek: Een overzicht van mogelijke rivierverruimende maatregelen in het stroomgebied. (2003). RIZA, RIZA rapport: 2003.020.

Boven-Rijn/Waal Maatregelenboek: Een overzicht van mogelijke rivierverruimende maatregelen in het stroomgebied. (2003). RIZA, RIZA rapport: 2003.022.

Dienst Landelijk Gebied regio Zuid. (2007). Zandmaas II Thema-uitwerking Grondstromen.

Peters, B. (2006). *Ecologisch herstel en inrichting projecten maasdal: Inventarisatie van kansrijke en geplande projecten en maatregelen*, Rijkswaterstaat

Ghimire, B. (2003). *No-regret solutions for intakes for secondary channels*. UNESCO-IHE, Delft, Nederland.

Appendix D: Afvoer- en sedimentkarakteristieken Rijn en Waal

Onderstaand zijn de afvoer en sedimentkarakteristieken van de Rijn en Waal weergegeven doordat in deze rivieren tot op heden de meeste meestromende nevengeulen zijn aangelegd. De afvoer- en sedimentkarakteristieken van deze rivieren spelen een belangrijke rol in hoe de morfologische ontwikkeling verloopt van meestromende nevengeulen.

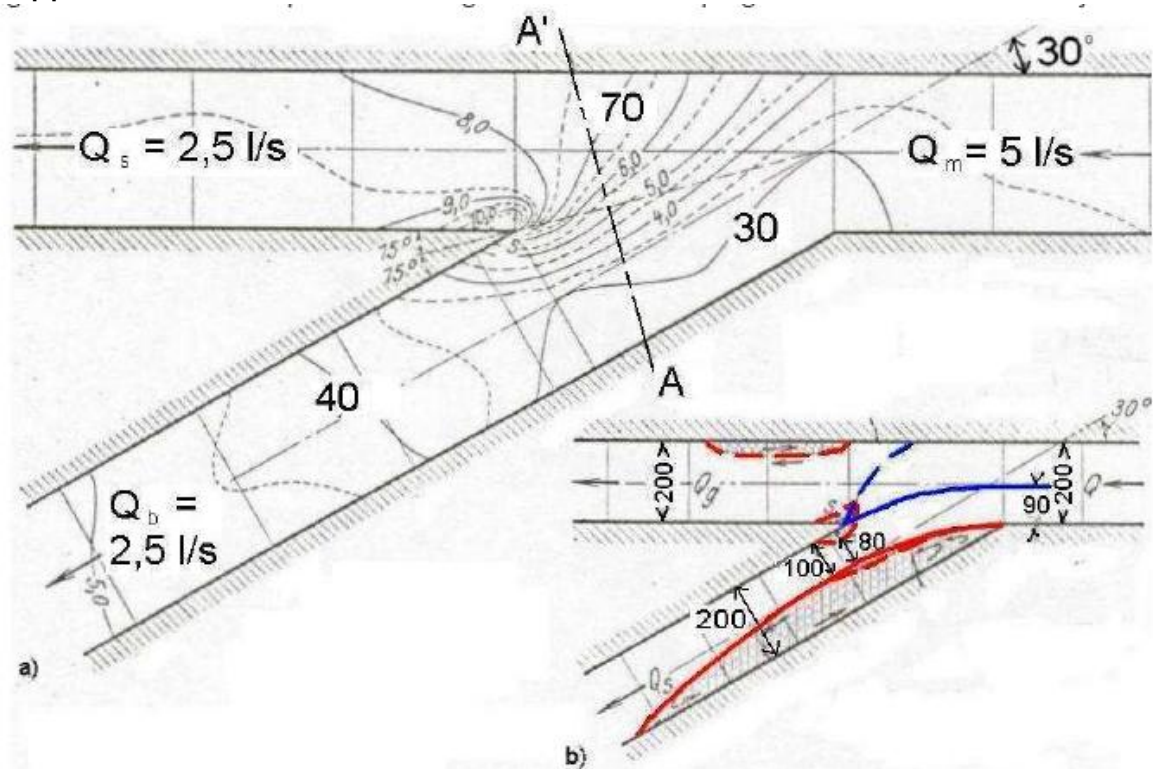
Tabel 14: Karakteristieken van de Rivier de Rijn. Uit Wolters, Platteeuw & Schoor (2001).

<i>Rivier</i>	<i>Rijn</i>
<i>Stroomgebied</i>	
Lengte (km)	1.320
Oppervlakte stroomgebied (km ²)	185.000
Oppervlakte stroomgebied in Nederland (km ²)	20.000
<i>Kengetallen Nederlandse Grens</i>	
Gemiddelde afvoer (m ³ /s)	2.220
Mediane afvoer (m ³ /s)	1.970
95 % onderschreidingsafvoer (m ³ /s)	4.470
5 % onderschreidingsafvoer (m ³ /s)	980
Hoogst gemeten afvoer (m ³ /s)	12.600
Laagst gemeten afvoer (m ³ /s)	575
Maatgevende afvoer (m ³ /s)	16.000
Waterstand bij gemiddelde afvoer (m+ NAP)	9,70
Jaarvracht zand en grind (m ³ /jaar)	500.000
Jaarvracht slib (ton/jaar)	2.500.000
Gemiddeld slibgehalte (mg/l)	30

Tabel 15: Karakteristieken van de Rivier de Waal. Uit Ghimire (2003)

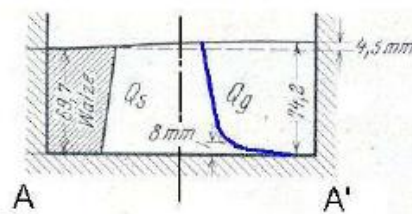
<i>Rivier</i>	<i>Waal</i>
<i>Karakteristieken Waal</i>	
Lengte tussen Pannerden en Gorinchem (km)	83
Gemiddelde afvoer (m ³ /s)	1.600
Laagste afvoer met ijsbedekking (m ³ /s)	460
Laagste afvoer zonder ijsbedekking (m ³ /s)	505
Hoogste afvoer ooit gemeten in 1926 (m ³ /s)	8.035
Hoogste afvoer recent gemeten (m ³ /s)	7.640
Stroomsnelheid (m/s)	0,5 - 2,0
Sedimentvracht (m ³ /y)	
- bed load (m ³ zand)	280.000
- suspensie (m ³ slib)	1.400.000
Regulerende breedte (m)	260
Gemiddelde zomerbedbreedte (m)	370
Gemiddelde winterbedbreedte (m)	1.470
Bodemverhang (cm/km)	11
Q(90%) = 329 dagen (m ³ /s)	865
Q(50%) = 183 dagen (m ³ /s)	1.345
Q(10%) = 37 dagen (m ³ /s)	2.145
Q(1%) = 3,7 dagen (m ³ /s)	4.247
Q(0,3%) = 1 dag (m ³ /s)	5.163

Appendix E: Schematisatie Bulle Effect

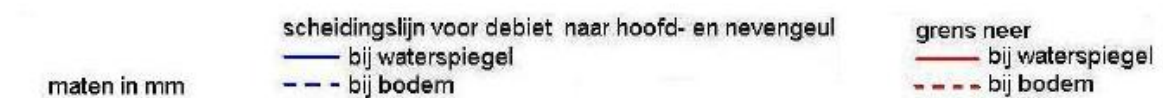


2.5a: Verloop hoogte waterspiegel.

2.5b: Stroombeeld.



2.5c: Dwarsdoorsnede A-A'.

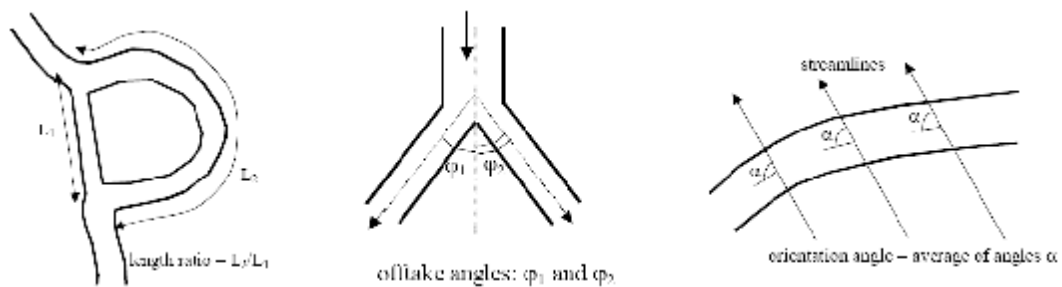


Figuur 56: Schematisatie van de waterbeweging bij splitsingspunten volgens Bulle (1926). Uit de Heer (2003).

Appendix F: Definities parameters Mosselman (2001)

De parameters die door Mosselman (2001) zijn opgesteld staan hieronder weergegeven samen met de bijhorende definities:

- relatieve lengteverhouding (zie figuur 57):
 - *verhouding tussen de lengte van de nevengeul (L_2) met de lengte van de hoofdgeul (L_1)*
- bifurcatiehoek in relatie met spiraalstroming (zie figuur 57):
 - *hoek tussen de hoofdgeul en de hoofdgeul bij de instroomopening.*
- oriëntatiehoek van de nevengeul (zie figuur 57):
 - *gemiddelde hoek tussen de nevengeul en de uiterwaardstroming tijdens een afvoer die hoger is dan de geulvullende afvoer van een nevengeul.*



figuur 57: Schematisatie parameters 'relatieve lengte verhouding', 'bifurcatiehoek', 'oriëntatiehoek'. Uit Mosselman (2001).

Appendix G: Ontwerpprincipes nevengeulen versus rivierfuncties

Bij het ontwerpen van een nevengeul moet rekening worden gehouden met de rivierfuncties veiligheid, scheepvaart en ecologie. Hieronder worden de ontwerprijchlijnen van nevengeulen per rivierfunctie kort besproken. Door Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007) in het rapport "Leidraad Rivieren" zijn de ontwerprijchlijnen nader uitgesplitst over de rivierfuncties veiligheid, ecologie en scheepvaart, in relatie met aanleg en beheer van een nevengeul, zie ook tabel 16, tabel 17 en Tabel 18.

Veiligheid

In eerste instantie moet een nevengeul over voldoende afvoercapaciteit beschikken om voldoende verlaging te kunnen geven aan maatgevende hoogwaterstanden (MHW). Anderzijds mag de afvoer naar een nevengeul niet te groot worden in relatie met te hoge stroomsnelheden in de nevengeul. Juist tijdens hoogwater situaties kan 'oncontroleerde erosie' zorgen voor mechanische instabiliteit van de winterdijk. Om deze reden worden nevengeulen zo aangelegd dat de stroomsnelheid in de nevengeul rondom 0,3 m/s ligt tijdens geulvullende afvoercondities. Hierdoor zal de morfologische activiteit in een nevengeul beperkt zijn en biedt het goede mogelijkheden voor de ecologische ontwikkeling. Ook moet er rekening gehouden worden met de kwelling, in relatie tot de mechanische instabiliteit van de nevengeul. Verder mag de stromingsweerstand in de nevengeul niet te hoog worden, in relatie met het reduceren van maatgevende hoogwaterstanden.

Scheepvaart

Voor de scheepvaart moet op de hoofdgeul de minimale vaardiepte behouden blijven in relatie met de Overeengekomen Lage Rivierwaterstanden (OLR) die gemiddeld 20 dagen per jaar overschreden worden. Voor de Waal wordt een OLR-2,8 meter vaardiepte gehanteerd bij een Overeengekomen Lage Afvoer (OLA) van 777 m³/s (Ghimire, 2003). Een vaak gehanteerde richtlijn hierbij is, dat een nevengeul niet meer dan 3 procent van de totale afvoer aan de hoofdgeul mag onttrekken tijdens geulvullende afvoercondities van de rivier. Hierbij blijft de aanzanding in de hoofdgeul beperkt tot gemiddeld 20 centimeter (Jans, 2004) waardoor de minimale vaardiepte niet in gevaar komt.

Ecologie

Vanuit de ecologie is het wenselijk dat de stroomsnelheid tussen de 0,1 m/s en 0,3m/s ligt, waardoor een nevengeul maar een beperkte afvoer mag onttrekken (Jans, 2004). Daarnaast heeft de ecologie baat bij een geringe waterdiepte en flauwe oeverwalen. Ook is enige morfologische dynamiek binnen een nevengeul gewenst voor de voortdurende ontwikkeling van pioniervegetaties.

tabel 16: Ontwerpprincipes die zijn gehanteerd uit oogpunt van veiligheid voor de nevengeulen van de Gamerensche Waard, uit: Leidraad rivieren: Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Fase	Aspect	Criterium	Indicatie / range
Aanleg	daling hoogwaterstanden	ontgraven volume	4-10 cm daling per miljoen m ³ ontgraving (Wolters et al., 2001)
		ligging tracé	in stroomvoerend deel van de uiterwaard, dichtbij het zomerbed, in een binnenbad (Agterdoot et al., 1999)
		orientatie tracé	tracé volgt stroomlijnen bij hoogwater
Beheer	sedimentatie nevengeul	locatie inlaat	bij voorkeur in buitenbad of zomerbed, benedenstrooms in het kribvak (Morseman et al., 2004)
		voormgeving inlaat	bij voorkeur met een bodemsprong
		zandvang	noe, tenzij locatie nu reeds zandvangsvoedig is (Jans, 2004)
	vegetatie-ontwikkeling	bodemhoogte geul	> 1 m waterdiepte bij mediane waterstand
		oevertaluds geul	1:5 of steiler
	aandrijving bandijk	afstand tot bandijk	50-100 m
		kringselgheid	zo recht mogelijk
		lokale versmallingen	oeververdediging na lokale versmallingen of voldoende ruimte voor oevererosie laten (Teeën en Haringa, 2003; Jans, 2004)

tabel 17: Ontwerpprincipes die zijn gehanteerd uit oogpunt van scheepvaart voor de nevengeulen van de Gamerensche Waard, uit: Leidraad rivieren: Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Fase	Aspect	Criterium	Indicatie / range
Aanleg	-	-	-
Beheer	aanlanding zomerbed	verandering hoogteligging bodem	maximaal 20 cm
	erosie nevengeul	shieldeparameter	< 0,03 bij geulvullende afvoer
	dwaarslroom	voormgeving uitlaat	b in de praktijk geen probleem (Jans, 2004)
	functiebehoud kribben	afstand tot kribwortel	minimaal 50 m

Tabel 18: Ontwerpprincipes die zijn gehanteerd uit oogpunt van ecologie voor de nevengeulen van de Gamerensche Waard, uit: Leidraad rivieren: Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)

Fase	Aspect	Criterium	Indicatie / range
Aanleg	afmetingen	lengte	geen beperking, wel indirect gezien de verstrekte stroomnelheid
		breedte	niet te benoemen, wel indirect gezien de verstrekte stroomnelheid
		diepte	< 1 m waterdiepte bij mediane waterstand
	hydro-dynamisch	oevertalud	1:10 of flauwer, plaatselijk een steilwand
		stroomnelheid	0,05-0,3 m/s bij mediane waterstand
Beheer	morpho-dynamisch	shieldeparameter	> 0,05 bij geulvullend debiet
		breedte:diepte-verhouding	> 50 voor zandbanken > 100 voor eilanden (Gutdelkoop et al., 2003)
	levensduur/ beheer-intensiteit	bodemsubstraat	geen voorkeur voor zand, klei of dilt
		meestroom-frequentie nevengeul	> 9 maanden/jaar
		vegetatiebeheer oevers	afhankelijk van natuuroverstelsing: 1 maal per 5 jaar (pienro) tot 50 jaar (climaxvegetatie) ingrijpen

Appendix H: Volume verandering nevengeulen van Gameren

De Oost-Geul en de West-Geul zijn eind 1996 aangetakt op de rivier de Waal. De grote geul is in het jaar eind 1999 aangelegd en aangetakt aan de rivier de Waal. Toch vindt er voor het jaar 1999 sedimentatie plaats in de grote geul. Dit is sedimentatie die is opgetreden tijdens afvoersituaties die groter zijn dan de geulvullende afvoer. Hierbij stroomt het water de nevengeul in zonder dat deze is aangetakt op de Waal. In onderstaande tabel is per periode aangegeven hoeveel aanzanding/erosie er heeft plaatsgevonden. Echter doordat de bodemhoogte maar een paar keer gemeten is tijdens de gehele monitoring, zijn de meetpunten lineair met elkaar verbonden. Dit is ook gedaan in figuur 9a waarin de cumulatieve verandering is weergegeven, zie figuur 9.

Tabel 19: Hoeveelheid sedimentatie en erosie per periode van de nevengeulen van Gameren door lineair de meetpunten met elkaar te verbinden.

		Volume sediment of erosie per jaar					
Jaartal		Oost-geul	West-geul	Hoofdgeul A	Hoofdgeul B	Hoofdgeul C (zandvang)	Hoofdgeul D
Januari	1997	0	0	"_"	"_"	"_"	"_"
Juli	1997	1000	1100	0	750	1800	1000
Januari	1998	1000	1100	0	750	1800	1000
Juli	1998	1000	1100	0	750	1800	1000
Januari	1999	1000	1100	0	750	1800	1000
Juli	1999	1000	1100	0	750	1800	1000
Januari	2000	1000	1500	0	1250	6000	1000
Juli	2000	700	3250	1000	5000	13000	2500
Januari	2001	700	3250	-2000	3000	11000	1500
Juli	2001	600	3250	-6000	-4000	3000	-1000
Januari	2002	500	3250	-5000	-3000	4000	-3000
Juli	2002	500	-10000	0	-1000	6000	-2500
Januari	2003	-4000	-5000	0	-1000	6000	-2500
Juli	2003	2500	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"
Januari	2004	2500	"_"	"_"	"_"	"_"	"_"
Netto Totaal		10000	5000	-12000	4000	58000	1000

"_": gegeven is niet bekend.

Appendix I: Afleiding morfologische evenwichtrelaties (11), (12) en (13)

Onderstaand zijn eerst de vergelijkingen van de water- en sedimentbeweging weergegeven en de splitsingspuntrelatie voor de sedimentbeweging. Met deze vergelijkingen kunnen de evenwichtsverhouding relaties (11), (12) en (13) worden afgeleid, zoals beschreven in de notitie Ribberink (2008).

$$Q_i = C_i^{3/2} \cdot i b_i^{1/2} \cdot B_i \quad (11)$$

$$i b_1 \cdot L_1 = i b_2 \cdot L_2 \quad (12)$$

$$Q_{si} = m \cdot Q_i^n \cdot h_i^{-n} \cdot B_i^{1-n} \quad (13)$$

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = X \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y \quad (14)$$

Met behulp van (11) geldt voor de debietverhouding Q_1/Q_2 in de 2 kanalen:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{3/2} \left(\frac{i_1}{i_2} \right)^{1/2} \frac{B_1}{B_2} \quad (15)$$

$$\text{Uit (12) volgt: } \frac{i_1}{i_2} = \frac{L_2}{L_1} \quad (16)$$

Met behulp van (13) geldt voor de transportverhouding Q_{s1}/Q_{s2} in de 2 kanalen:

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^n \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{-n} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-n} \quad (17)$$

Door (17) te combineren met de splitsingspuntrelatie (14) kunnen we de transportverhouding elimineren en ontstaat:

$$X \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^n \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{-n} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-n}$$

of:

$$\left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n = \frac{1}{X} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{n-Y} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{1-n} \quad (18)$$

We kunnen nu Q_1/Q_2 uit (15), na invulling van (16), invullen in (18) zodat een formule ontstaat voor de diepteverhouding in de 2 kanalen als functie van bekende grootheden:

$$\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^n = \frac{1}{X} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{n-Y} \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{3(n-Y)}{2}} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{n-Y}{2}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{n-Y} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-n}$$

Ofwel:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left\{ \frac{1}{X} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{n-Y} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{n-Y}{2}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-Y} \right\}^{\frac{2}{3Y-n}} \quad (19)$$

Dit kan worden ingevuld in (15) zodat:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{1/2} \frac{B_1}{B_2} \left\{ \left[\frac{1}{X} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{n-Y} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{n-Y}{2}} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{1-Y} \right]^{\frac{2}{3Y-n}} \right\}^{\frac{3}{2}}$$

ofwel na enige manipulatie:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left\{ \frac{1}{X^3} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2n} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^n \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{3-n} \right\}^{\frac{1}{3Y-n}} \quad (110)$$

Dit kunnen we invullen in de knooppuntrelatie (14), zodat :

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = X \left\{ \frac{1}{X^3} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2n} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^n \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{3-n} \right\}^{\frac{Y}{3Y-n}}$$

ofwel na enige manipulatie:

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left\{ \frac{1}{X^{\frac{n}{Y}}} \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2n} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^n \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{3-n} \right\}^{\frac{Y}{3Y-n}} \quad (111)$$

Appendix J: Omschrijven Sediment transportformule SOBEK

Hier wordt de methode beschreven hoe de 'power-law' sedimenttransport formule, die gebruikt wordt in de analytische parametrisatie, lokaal gefit kan worden op de "User-Defined" sedimenttransport formule uit het SOBEK-RE model (Notitie Ribberink, 2008). Vervolgens wordt voor verschillende afvoeren naar de Waal de parameters 'm' en 'n' berekend.

Methode beschrijving

Een transport formule in de vorm van Meyer-Peter-Müller (J1) kan 'lokaal', dat wil zeggen voor een bepaalde stroomsnelheid of Shields parameter in relatie met een bepaalde afvoer door de moedergeul, worden benaderd met een 'power-law' sediment transportformule (J2) aan de hand van de parameters 'm' en 'n'.

$$Q_{si} = B_{si} \cdot \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot A \cdot \frac{1}{1-e} \cdot b_u \cdot (m \cdot q_s)^{y_u} \cdot (m \cdot q_s - q_c)^{a_u} \quad (J1)$$

$$Q_{si}^* = B_i \cdot m \cdot u^n \quad (J2)$$

$$Q_{si} = B_i \cdot a \cdot (u^2 - b)^c \quad (J3)$$

Het fitten van vergelijking (J2) aan vergelijking (J3) kan worden gedaan voor een bepaalde (representatieve) snelheid u_{fit} door te eisen dat:

$$- Q_{si}(u_{fit}) = Q_{si}^*(u_{fit}) \quad (J4)$$

$$- \left(\frac{\partial Q_{si}}{\partial u} \right)_{u=u_{fit}} = \left(\frac{\partial Q_{si}^*}{\partial u} \right)_{u=u_{fit}} \quad (J5)$$

Invullen van (J2) en (J3) in (J4) levert op:

$$m = \frac{a \cdot (u_{fit}^2 - b)^c}{u_{fit}^n} \quad (J6)$$

Invullen van (J2) en (J3) in (J5) levert op:

$$B_i \cdot a \cdot c \cdot (u_{fit}^2 - b)^{c-1} \cdot 2 \cdot u_{fit} = B_i \cdot m \cdot n \cdot u_{fit}^{n-1}$$

$$\frac{c \cdot 2 \cdot u_{fit}}{(u_{fit}^2 - b)} \cdot B_i \cdot a \cdot (u_{fit}^2 - b)^c = B_i \cdot n \cdot \frac{m \cdot u_{fit}^n}{u_{fit}}$$

$$\frac{c \cdot 2 \cdot u_{fit}}{(u_{fit}^2 - b)} \cdot Q_{si}(u_{fit}) = n \cdot \frac{Q_{si}^*(u_{fit})}{u_{fit}}$$

Omdat $Q_{si}(u_{fit}) = Q_{si}^*(u_{fit})$ volgt nu:

$$n = \frac{2 \cdot c}{\left(1 - \frac{b}{u_{fit}^2}\right)} \quad (J7)$$

Berekening van de waarden 'm' en 'n' voor de Waal (sectie 2)

In dit onderzoek is ervoor gekozen om de nevengeulontwerpen in het SOBEK-RE model te schematiseren in de Waal (sectie 2). De 'User-Defined' sedimenttransport formule (J1) moet eerst herschreven worden naar vergelijking (J3) voordat de parameters 'm' en 'n' in de 'power-law' sediment transportformule (J2) kunnen worden berekend voor verschillende afvoeren naar de Waal. De 'User-Defined sedimenttransport formule uit het SOBEK-RE model' is weergegeven in vergelijking (J8).

$$Q_s = B \cdot \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot f \quad (J8)$$

$$\text{met 'transport parameter'} = f = \frac{A \cdot b_u}{1-e} \cdot (m \cdot q_s)^{y_u} (m \cdot q_s - q_c)^{a_u}$$

$$\text{met 'flow parameter'} = q_s = \frac{u^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}}$$

Voor de Waal, sectie 2, geldt dat $y_u = 0$ waardoor (J8) omgeschreven kan worden in (J9)

$$Q_s = B \cdot \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot \frac{A \cdot b_u}{1-e} \cdot \left(m \cdot \frac{u^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}} - q_c \right)^{a_u} \quad (J9)$$

Door deze vergelijking, (J9), nu te herschrijven naar vergelijking (J3), wordt vergelijking (J10) verkregen:

$$Q_{si} = B_i \cdot a \cdot (u^2 - b)^c \quad (J3)$$

$$Q_{si} = B_i \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot A \cdot b_u}{(1-e)} \right) \cdot \left(m^{-1} \cdot C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50} \right)^c \cdot (u^2 - q_c \cdot m^{-1} \cdot C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50})^c \quad (J10)$$

$$\text{met } a = \left(\frac{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot A \cdot b_u}{(1-e)} \right) \text{ en } b = q_c \cdot m^{-1} \cdot C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}$$

Nu de uitdrukkingen voor de parameters 'a' en 'b' bekend zijn kan de 'power-law' transport formule gefit worden op de 'User-Defined' transportformule bij verschillende afvoeren naar de Waal (sectie 2). In het Rijntakken model wordt de Chezy coëfficiënt in de Waal afhankelijk gesteld van de afvoer (waterdiepte). De 'ripple factor' en de overige parameters zijn constant of worden constant verondersteld. De waarden van de constante parameters in de 'user-defined' sediment transportformule voor de Waal (sectie 2) zijn weergegeven in tabel (#). De waarden van de stromingsweerstand en de stroomsnelheid, afhankelijk van

de afvoer, zijn weergegeven in tabel 8. In tabel 8 zijn ook de berekende waarden voor de parameters 'a', 'b', 'n' en 'm' weergegeven.

tabel 20: De constante waarden van de parameters in de 'user-defined' sediment transportformule van de Waal (sectie 2)

<i>Parameters in 'user-defined' sediment transportformule</i>	<i>Waarden [eenheid]</i>
A (correctiefactor)	0,8 [-]
ϵ (porositeit)	0,4 [-]
α_u (constante)	1,5[-]
β_u (constante)	8 [-]
γ_u (constante)	0 [-]
θ_c (aanvangswaarde van sedimenttransport)	0,025 [-]
μ (ripple factor)	0,7 [-]
D_{50} (korrelgrootte)	0,001 [m]
D_{90} (korrelgrootte)	0,005 [m]
Δ (relatieve dichtheid sediment)	1,65 [-]
g (graviteitsversnelling)	9,81 [m/s ²]

tabel 21: Waarden van 'n' en 'm' bij verschillende afvoeren door moedergeul Q_0

<i>Parameters SOBEK</i>				<i>Parameters berekend</i>			
Q_0 [m ³ /s]	S_0 [m ³ /s]	C_0 [m ^{1/2} /s]	u_0 [m/s]	a [s]	b [m ² /s ²]	n [-]	m [m]
1000	0.008	53	0.83	7,97E-05	1,66E-01	3.95	6,29E-05
1500	0.02	48.8	0.98	1,02E-04	1,40E-01	3.51	8,14E-05
2000	0.043	45.57	1.11	1,25E-04	1,22E-01	3.33	1,03E-04
3000	0.11	42.17	1.38	1,58E-04	1,05E-01	3.17	1,37E-04
4000	0.17	42.5	1.58	1,54E-04	1,06E-01	3.13	1,36E-04
4500	0.19	42.77	1.66	1,52E-04	1,08E-01	3.12	1,34E-04

Appendix K: Stabiliteit watersysteem bij identieke en niet identieke kanalen

Zoals beschreven in paragraaf 3.4, zie figuur 1, is een kanaal in evenwicht wanneer de instroom van het sediment (sedimentaanbod) gelijk is aan de uitstroom van het sediment (transportcapaciteit) in een kanaal. Echter in de praktijk kunnen zich verstoringen voordoen in het watersysteem waardoor de waterdiepteverhouding in het watersysteem weer kan worden beïnvloed. Een voorbeeld van een verstoring dat zich kan voordoen is dat er bij een zekere afvoer de ene keer meer of minder sediment door de rivier wordt getransporteerd. Dit komt omdat de afvoer-sediment relatie in werkelijkheid nooit precies aan elkaar gelijk hoeft te zijn over een zekere periode. Wanneer er een verstoring optreedt in de waterdiepte, stel een waterdiepte vergroting in een van de kanalen, dan zal de in- en uitstroom van het sediment naar de kanalen veranderen wanneer het debiet verandert. Dit betekent dat de stabiliteit van het gevonden evenwicht dus afhankelijk is van, in relatie met een waterdiepte verstoring, of de instroom van het sediment (sedimentaanbod) wel of niet groter wordt dan de uitstroom van het sediment (transportcapaciteit):

Stabiel evenwicht

Het gevonden evenwicht is een stabiel evenwicht wanneer $\left| \frac{dQ_{\sin}}{dQ} \right| > \left| \frac{dQ_s}{dQ} \right|$

- In deze situatie zal het watersysteem zich altijd herstellen naar het oorspronkelijke evenwicht. Dit komt omdat in deze situatie, nadat zich een waterdiepteverstoring heeft voorgedaan in het watersysteem, de instroom van het sediment altijd groter is dan de uitstroom van het sediment.

Instabiel evenwicht

Het gevonden evenwicht is een instabiel evenwicht wanneer $\left| \frac{dQ_{\sin}}{dQ} \right| < \left| \frac{dQ_s}{dQ} \right|$

- In deze situatie kan het watersysteem zich niet herstellen naar het oorspronkelijke evenwicht. Dit komt omdat in deze situatie, nadat zich een waterdiepteverstoring heeft voorgedaan, de uitstroom van het sediment altijd groter is dan de instroom van het sediment. Dit proces versterkt zichzelf waardoor één kanaal volledig zal eroderen totdat het andere kanaal volledig dicht gesedimenteerd is.

Het bereiken van een stabiel of een instabiel evenwicht tussen twee benedenstroomse aangetakte kanalen is afhankelijk van een kritieke Y-waarde. Dit kan bewezen worden door vergelijkingen op te stellen voor het sedimentaanbod en voor de transportcapaciteit van het kanaal, waarin beide vergelijkingen afhankelijk worden gesteld van de waterdiepteverhouding (h_1/h_2).

De vergelijking van het sedimenttransport (K4) kan worden verkregen door vergelijking (K1) in te vullen in vergelijking (K2). De vergelijking van het sedimentaanbod (K5), kan worden verkregen door vergelijking (K1) in te vullen in de splitsingspuntrelatie (K3).

$$Q_i = C_i \cdot h_i^{\frac{3}{2}} \cdot i b_i^{\frac{1}{2}} \cdot B_i \quad (\text{krachtenbalans waterbeweging}) \quad (K1)$$

$$Q_{si} = m \cdot Q_i^n \cdot h_i^{-n} \cdot B_i^{1-n} \quad (\text{krachtenbalans sedimentbeweging}) \quad (K2)$$

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = X \cdot \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^Y \quad (\text{splitsingspuntrelatie}) \quad (K3)$$

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{n/2} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right) \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^n \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{n/2} \quad (K4)$$

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = X \cdot \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\frac{3Y}{2}} \cdot \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^Y \cdot \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^Y \cdot \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{\frac{Y}{2}} \quad (K5)$$

De macht van de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) is in beide bovenstaande relaties is verschillend en bepaalt de verhoudingen van de in- en uitstroom van het sedimenttransport tussen beide kanalen. Door de machten van deze verhoudingen (h_1/h_2) in een vergelijking tegenover elkaar te zetten kan de stabiliteitsrandvoorwaarde $Y=n/3$ verkregen worden.

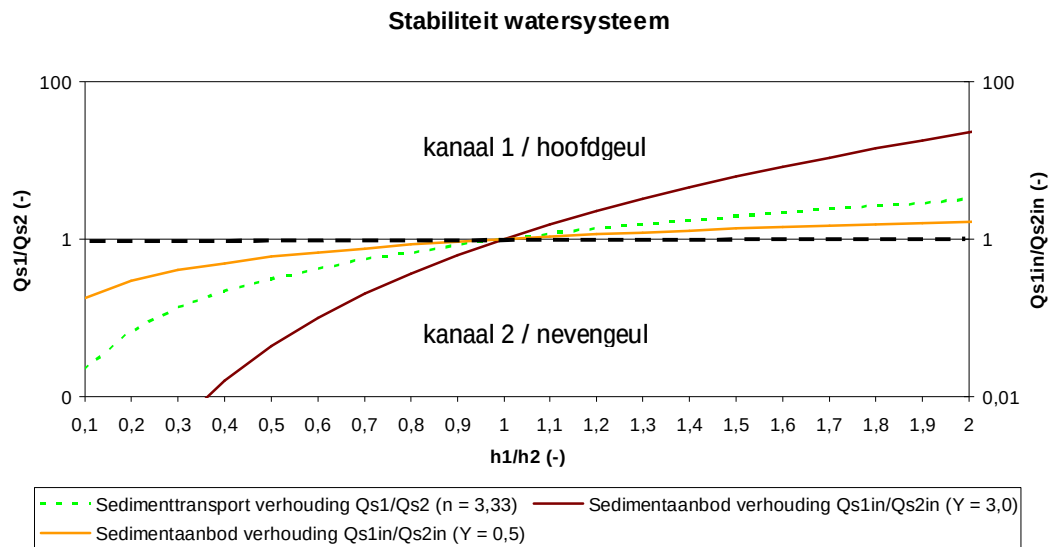
Alleen wanneer $Y > n/3$ leidt een grotere (resp. kleinere) waterdiepteverhouding (h_1/h_2) tot een grotere toename (resp. afname) in het sedimentaanbod dan de toename (resp. afname) in de sedimenttransportcapaciteit van de geul zelf. In gevallen waarbij $Y < n/3$ is het net andersom. In dit geval leidt een grotere (resp. kleinere) waterdiepteverhouding (h_1/h_2) tot een kleinere toename (resp. afname) in het sedimentaanbod dan de toename (resp. afname) in de sedimenttransportcapaciteit van de geul zelf.

Onderstaand kunnen de verschijnselen inzichtelijk worden gemaakt aan de hand van figuur 58. Hier is een situatie geschematiseerd waarbij de moedergeul zich opsplijt in twee identieke benedenstroomse kanalen die in de breedte ($B_{1,2} = 30$ m) en in de lengte ($L_{1,2} = 2500$ m) aan elkaar gelijk zijn (figuur 60). Hiervoor is bewust gekozen doordat dan de debietverhouding (Q_1/Q_2) gelijk is aan 1, waardoor het stabiele evenwicht altijd bij een waterdiepteverhouding (h_1/h_2) van 1 ligt. Dit betekent ook dat de parameter 'Y' in eerste instantie geen invloed heeft op de sedimentverdeling totdat er een verstoring optreedt in de waterdiepteverhouding, dat vervolgens weer resulteert in een debietverhouding $Q_1/Q_2 \neq 1$. In figuur 58 zijn de vergelijkingen (K4) en (K5) inzichtelijk gemaakt met i) $n=3,33$ en $Y=3$ ($Y>n/3$) en met ii) $n=3,33$ en $Y = 0,5$ ($Y<n/3$). Verder is de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) als een onafhankelijke variabele gesteld, waarbij een verstoring van de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) zorgt voor verandering van de transportcapaciteitsverhouding (Q_{s1}/Q_{s2}) en de sedimentaanbodverhouding (Q_{s1in}/Q_{s2in}).

Verstoring in relatie met de waterdiepteverhouding

Doordat de verschijnselen worden gekoppeld aan een vergroting (resp. verlaging) van de waterdiepteverhouding volgt hieronder een omschrijving wanneer de waterdiepteverhouding groter of kleiner wordt.

- verstoring 1 leidt tot een grotere waterdiepteverhouding ($> h_1/h_2$) als gevolg van erosie in hoofdgeul (grotere h_1 in kanaal 1) en/of door sedimentatie in nevengeul (kleinere h_2 in kanaal 2);
- Verstoring 2 leidt tot een kleinere waterdiepteverhouding ($< h_1/h_2$) als gevolg van sedimentatie in hoofdgeul (kleinere h_1 in kanaal 1) en/of door erosie in nevengeul (grotere h_2 in kanaal 2).



figuur 58: In deze figuur is de stabiliteit van twee identieke kanalen weergegeven waarbij sedimenttransportcapaciteit (uitstroom sediment) en het sedimentaanbod (instroom sediment) als functie van de waterdiepteverhouding staat weergegeven. In dit voorbeeld is Y_{crit} gelijk aan 1,11. Doordat de kanalen identiek aan elkaar zijn bevindt zich het evenwicht waarbij de waterdiepteverhouding (h_1/h_2) gelijk is aan 1. Hierbij zijn ook de verhoudingen van de sedimenttransportcapaciteit en het sedimentaanbod gelijk aan 1.

Stabiele situatie ($Y = 3,0$)

Zoals in figuur 58 is te zien is leidt een verstoring 1 ($> h_1/h_2$), tot een grotere toename in de sedimentaanbodverhouding ($Q_{s1in}/Q_{s2in} = >> 1$) dan de toename in de sedimenttransportcapaciteitsverhouding ($Q_{s1}/Q_{s2} = > 1$). Hierdoor wordt er meer sediment naar kanaal 1 getransporteerd dan dat kanaal 1 daadwerkelijk kan transporteren. Hierdoor ontstaat sedimentatie in kanaal 1 en erosie in kanaal 2 waardoor de waterdiepteverstoring weer teniet wordt gedaan. Dit proces gaat door totdat de waterdiepteverhouding weer gelijk is aan 1

Zoals in figuur 58 is te zien is leidt een verstoring 2 ($< h_1/h_2$) tot een grotere afname van de sedimentaanbodverhouding ($Q_{s1in}/Q_{s2in} = << 1$) dan de afname van de sedimenttransportcapaciteitsverhouding van het sediment ($Q_{s1}/Q_{s2} = < 1$). Hierdoor wordt er meer sediment naar kanaal 2 getransporteerd dan dat kanaal 2 daadwerkelijk kan transporteren. Hierdoor ontstaat weer sedimentatie in kanaal 2 en erosie in kanaal 1 waardoor de waterdiepteverstoring teniet wordt gedaan. Dit proces gaat door totdat de waterdiepteverhouding weer gelijk is aan 1

Instabiele situatie ($Y = 0,5$)

Zoals in figuur 58 is te zien is leidt een verstoring 1 ($> h_1/h_2$), tot een kleinere toename in de sedimentaanbodverhouding ($Q_{s1in}/Q_{s2in} = > 1$) dan de toename in de sedimenttransportcapaciteitsverhouding ($Q_{s1}/Q_{s2} = >> 1$). Hierdoor wordt er minder sediment naar kanaal 1 getransporteerd dan dat daadwerkelijk in kanaal 1 getransporteerd wordt. Hierdoor ontstaat erosie in kanaal 1 en sedimentatie in kanaal 2 waardoor de waterdiepteverstoring wordt versterkt. Dit erosieproces van kanaal 1 gaat door totdat kanaal 2 volledig dicht gesedimenteerd is.

Zoals in figuur 58 is te zien is leidt een verstoring 2 ($< h_1/h_2$), tot een kleinere afname in de sedimentaanbodverhouding ($Q_{s1in}/Q_{s2in} = < 1$) dan de afname in de sedimenttransportcapaciteitsverhouding ($Q_{s1}/Q_{s2} = << 1$). Hierdoor wordt er minder sediment naar kanaal 2 getransporteerd dan dat daadwerkelijk in kanaal 2 getransporteerd wordt. Hierdoor ontstaat erosie in kanaal 2 en sedimentatie in kanaal 1 waardoor de waterdiepteverstoring wordt versterkt. Dit erosieproces van kanaal 2 gaat door totdat kanaal 1 volledig dicht gesedimenteerd is.

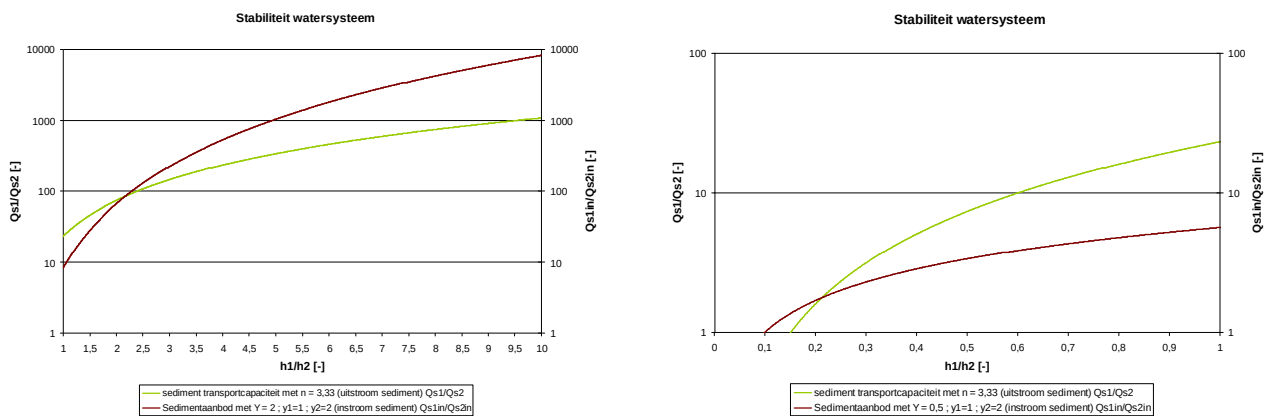
Deze bovenstaande verschijnselen doen zich ook voor in een situatie waarbij de moedergeul zich splitst in een nevengeul en in een hoofdgeul (figuur 60). Echter in deze situatie zal bij verandering van de parameter 'Y' het evenwicht verplaatsen naar een andere waterdiepteverhouding doordat hier de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) niet meer gelijk is aan 1. Dit komt omdat de twee benedenstroomse kanalen van de moedergeul (hoofd- en nevengeul) niet meer identiek aan elkaar zijn. De principes van bovenstaande verschijnselen blijven echter wel hetzelfde.

In de standaardcase geldt voor de stabiliteitsrandvoorwaarde dat $Y > 1,11$ (met $n = 3.33$ bij geulvullende afvoer van $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$).

In figuur 59 (rechts) is het sedimentaanbod en de transportcapaciteit verhouding tussen de hoofdgeul en de nevengeul met een waarde van $Y = 2$ weergegeven en is dus een stabiele situatie ($Y > n/3$). Hierbij is de evenwichtsdiepte verhouding (h_1/h_2) tussen de hoofdgeul en nevengeul gelijk aan 2,17 (zie standaardcase beschrijving en figuur 10). In dit geval leidt een grotere (resp. kleinere) waterdiepteverhouding (h_1/h_2) altijd tot een grotere toename (resp. afname) in de sedimentaanbodverhouding dan de toename (resp. afname) van de sediment-transportcapaciteitsverhouding.

In figuur 59 (links) is het sedimentaanbod en de transportcapaciteit verhouding tussen de hoofdgeul en de nevengeul met een waarde van $Y = 0,5$ weergegeven en is dus een instabiele situatie ($Y < n/3$). Hierbij is de evenwichtsdiepte verhouding (h_1/h_2) tussen de hoofdgeul en nevengeul gelijk aan 0,21. In dit geval leidt een grotere (resp. kleinere) waterdiepte verhouding (h_1/h_2) altijd tot een kleinere toename (resp. afname) van het inputtransport dan de toename (resp. afname) van het sedimenttransport in de geul zelf. In deze gevallen, afhankelijk van de verstoring, zal de hoofdgeul of de nevengeul volledig dicht sedimenteren.

figuur 59: in deze figuur is de stabiliteit van een watersysteem bestaande uit 2 niet identieke kanalen weergegeven. In de linker figuur is een instabiele situatie weergegeven. In de rechter figuur is een stabiele evenwichtsituatie weergegeven met $Y = 2$,



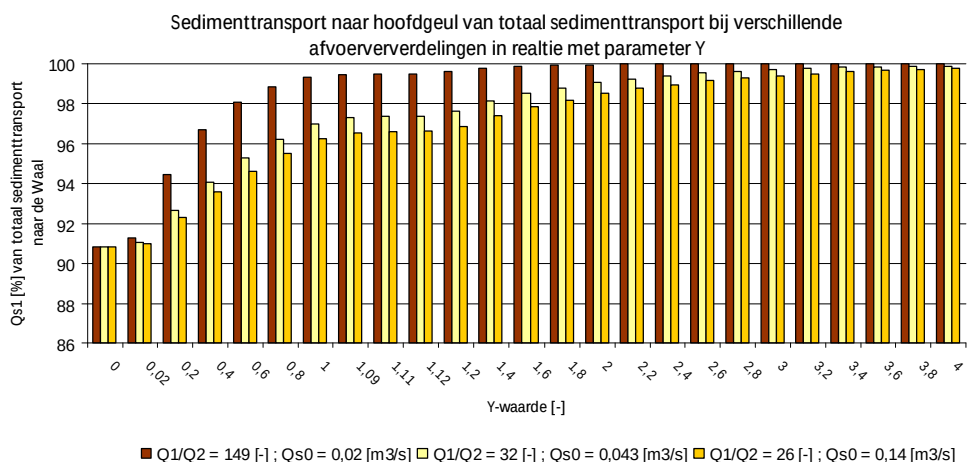
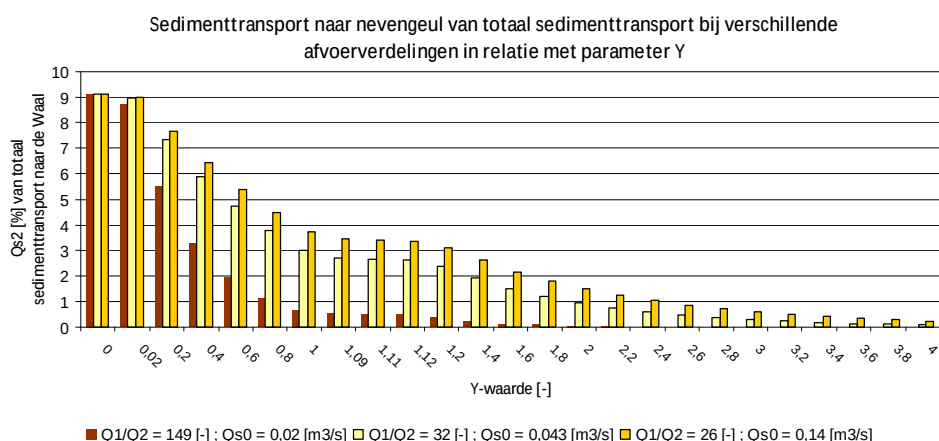
figuur 60: links een schematisatie van twee identieke kanalen (gelijkwaardig) waarbij in initiële situatie de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) gelijk is aan 1. Rechts een schematisatie van een nevengeul en een hoofdgeul waarbij de kanalen niet identiek aan elkaar zijn. Hierbij is de breedteverhouding (B_1/B_2) en de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) veel groter is dan 1.

Appendix L: Transport naar hoofd- en nevengeul van totaal sedimenttransport

In onderstaande grafieken is het initiële sedimenttransport weergegeven naar de hoofd- en een (ongelijkwaardige) nevengeul zoals deze volgt uit de splitsingspuntrelatie (vergelijking 10) bij verschillende afvoerverdelingen in de Waal (zie tabel 22). Hierbij is de breedteverhouding (B_1/B_2) van de hoofdgeul (298 meter) en de nevengeul (30 meter) gelijk aan 10. Verder onttrekt de nevengeul niet meer dan 3 procent van de afvoer tijdens geulvullende afvoercondities in de Waal. Uit deze grafieken is duidelijk af te leiden dat het sedimenttransport naar de nevengeul (resp. hoofdgeul) afneemt (resp. toeneemt) wanneer parameter 'Y' groter wordt ongeacht de afvoerverdeling. Wel neemt het sedimenttransport naar de nevengeul toe, bij een zekere waarde voor parameter 'Y' wanneer het debiet naar de nevengeul toeneemt. Dit betekent dat er juist tijdens hogere afvoercondities, wanneer de afvoerverdeling (Q_1/Q_2) kleiner wordt, meer sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Verder kan geconcludeerd worden dat er nog steeds relatief meer sedimenttransport naar de hoofdgeul plaatsvindt dan naar de nevengeul. Er zal niet snel meer dan 10 procent van het totale sedimenttransport van de Waal naar de nevengeul getransporteerd worden.

tabel 22: Afvoerverdeling hoofd- en nevengeul bij een zekere afvoer en sedimenttransport naar de Waal

Afvoer Waal [m^3/s]	Sedimenttransport Waal [m^3/s]	Afvoer hoofdgeul [m^3/s]	Afvoer nevengeul [m^3/s]	Afvoerverdeling [-]
1500	0,02	1490	10	149
2000	0,043	1940	60	32
4000	0,14	3850	150	26



Appendix M: Beschikbare splitsingspuntrelaties in SOBEK

In het SOBEK-RE model zijn een drietal verschillende typen splitsingspuntrelaties beschikbaar, zie onderstaand (SOBEK manual). In al deze splitsingspuntrelaties is de sedimentverdeling afhankelijk van de afvoerverdeling. Daarnaast geldt altijd de massa balans van de sedimentbeweging zoals weergegeven in vergelijking (M1)

$$Q_{s0} = Q_{s1} + Q_{s2} \text{ (massabalans sedimentbeweging)} \quad (M1)$$

- Sedimentverdeling proportioneel naar de afvoer verdeling:

$$Q_{si} = \frac{Q_i}{Q_t} \cdot Q_{s0} \quad (M2)$$

- Sedimentverdeling als een lineaire functie van de afvoerverdeling:

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = F = a \cdot \frac{Q_1}{Q_2} + b \quad (M3)$$

$$Q_{s1} = \frac{F}{1+F} \cdot Q_{s0} \quad (M4)$$

$$Q_{s2} = \frac{1}{1+F} \cdot Q_{s0} \quad (M5)$$

- Sedimentverdeling als een machtsfunctie van de afvoerverdeling:

$$\frac{Q_{s1}}{Q_{s2}} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^k \cdot \left(\frac{B_{s1}}{B_{s2}} \right)^{1-k} \cdot \left(\frac{g_1}{g_2} \right) \quad (M6)$$

$$Q_{s1} = \frac{F}{1+F} \cdot Q_{s0} \quad (M7)$$

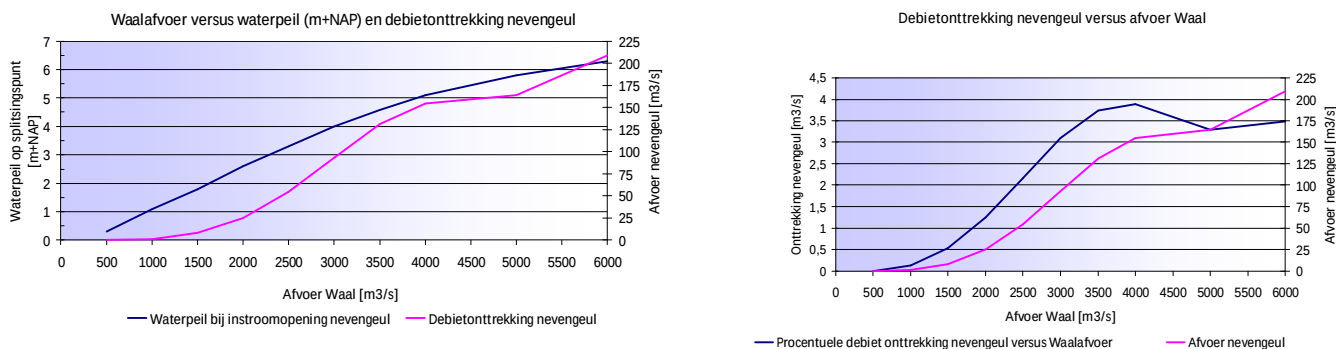
$$Q_{s2} = \frac{1}{1+F} \cdot Q_{s0} \quad (M8)$$

Voor dit onderzoek is de meest geavanceerde splitsingspuntrelatie gekozen waarbij de sedimentverdeling via een machtsfunctie afhankelijk is van de afvoerverdeling. Dit is de enige splitsingspuntrelatie waarbij de sedimentverdeling niet-lineair verdeeld wordt naar de afvoerverdeling, dat overeenkomt met de meeste gevallen in de praktijk. Deze relatie is ook de meest algemene splitsingspuntrelatie die in de wetenschap gebruikt wordt bij het modeleren van twee of meer benedenstroomse kanalen van splitsingspunten.

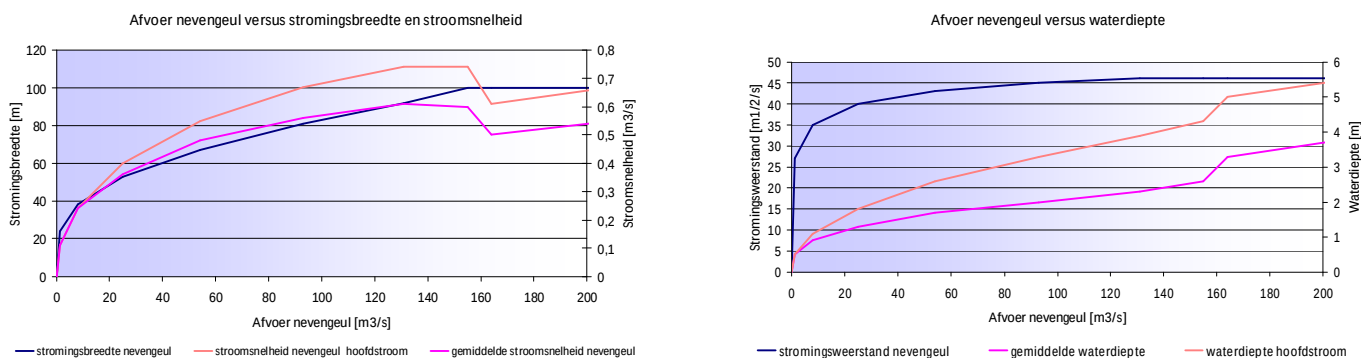
Appendix N: Hydraulische gegevens SOBEK nevengeul versus Waalafvoer

In onderstaande grafieken staan hydraulische gegevens van de SOBEK nevengeul in relatie met verschillende Waalafvoeren weergegeven. De geometrie en de ligging van de SOBEK nevengeul staat beschreven in hoofdstuk 6. Bij een Waalafvoer van 500 m³/s heerst er een waterpeil van 0,3 m+NAP op het splitsingspunt rivierkilometer 937, waarbij de nevengeul droog staat als gevolg van een instroompeil van 0,4 m+NAP. De nevengeul onttrekt bij een Waalafvoer van 2.000 m³/s een debiet van 25 m³/s. Dit is een procentuele onttrekking van 1,25 procent van de totale afvoer van de Waal. Bij een Waalafvoer van 6.000 m³/s onttrekt de nevengeul een debiet van 210 m³/s.

De stromingsbreedte van de nevengeul loopt op tot 100 meter dat bereikt wordt bij een debiet van circa 160 m³/s naar de nevengeul. De maximale stroomsnelheden die in de nevengeul zullen voorkomen liggen rondom de 0,6 m/s. Bij een Waalafvoer van 2.000 m³/s (onttrekking van 25 m³/s door de nevengeul) ligt de stroomsnelheid in de nevengeul globaal tussen 0,3 – 0,4 m/s. Hierbij heerst een gemiddelde waterdiepte van 1,3 meter. De maximale waterdiepte in de hoofdstroom van de nevengeul bedraagt 5,5 meter bij een Waalafvoer van 6.000 m³/s.

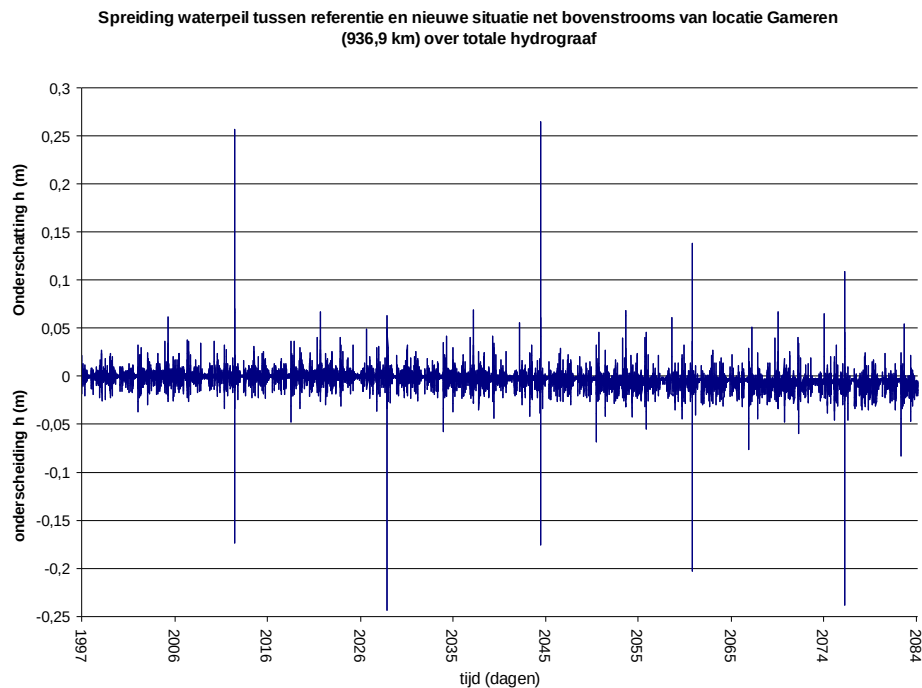


figuur 61: Hydraulische afvoergegevens van de SOBEK nevengeul in relatie met de Waalafvoer

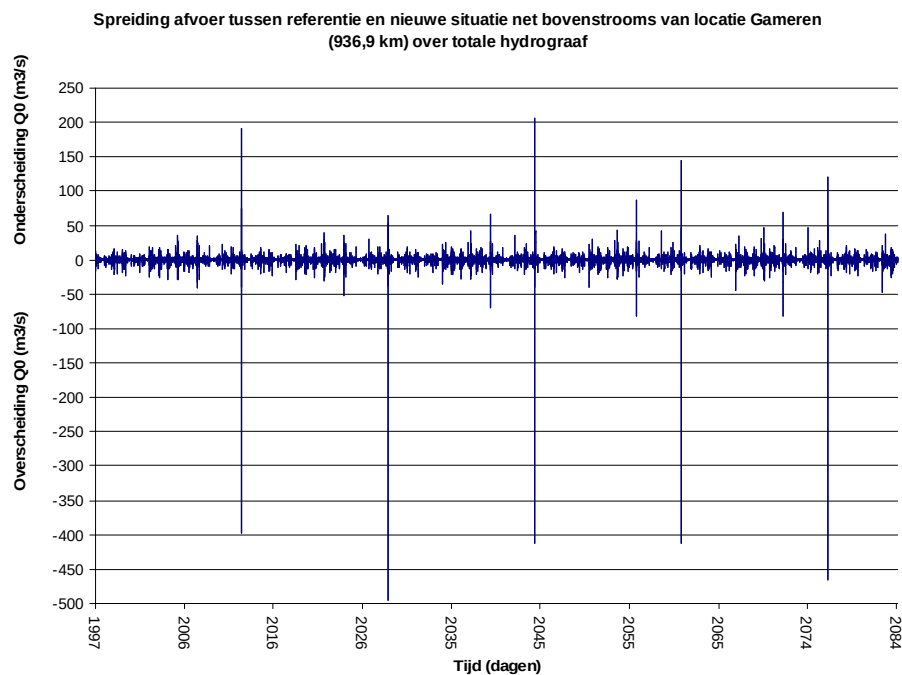


figuur 62: Hydraulische karakteristieken van de SOBEK nevengeul in relatie met de Waalafvoer

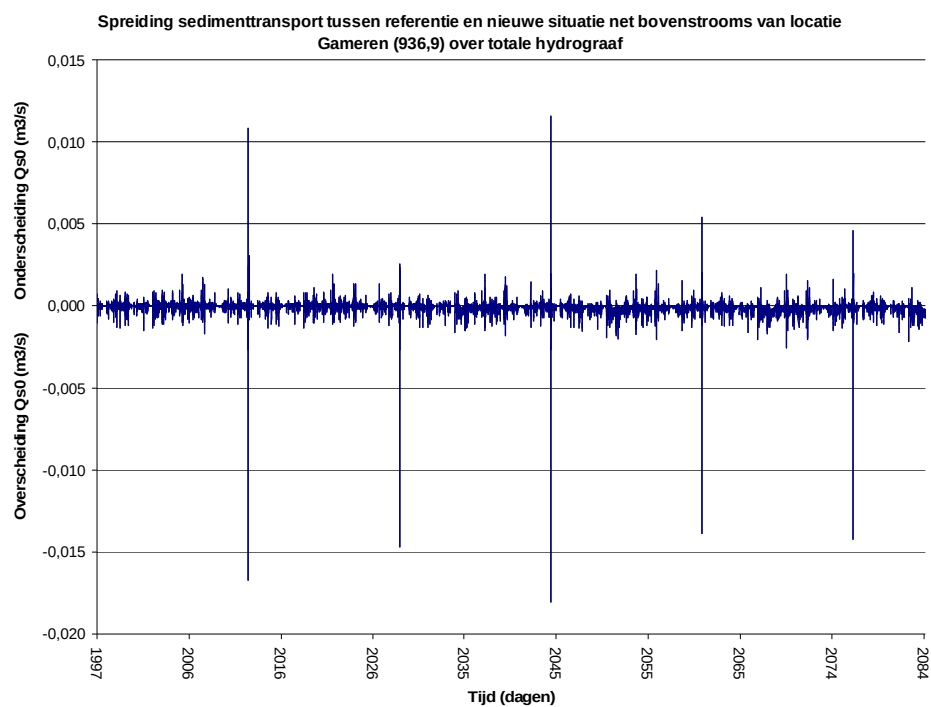
Appendix O: Validatie Nieuw Model



Figuur 22: Spreiding waterpeil tussen referentie en de nieuwe situatie



Figuur 23: Spreiding afvoer tussen referentie en de nieuwe situatie.



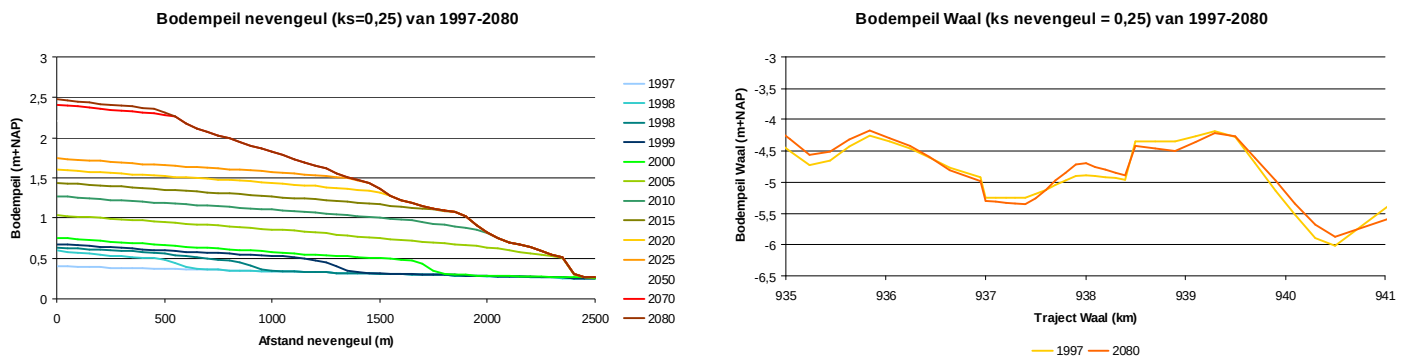
Figuur 24: Spreiding sedimenttransport tussen referentie en het nieuwe Rijntakken model.

Appendix P: Variatie in de geometrie parameters

In de situaties I tot en met K worden de invloeden van de ontwerpparameters ' C_2 ', ' B_2 ' en ' L_2 ' geanalyseerd op de morfologische ontwikkeling van de nevengeulen en op de evenwichtsdiepte en tijdschalen. Deze verandering op de ontwerpparameters zijn toegepast op situatie A (stationaire afvoersituatie van $2000 \text{ m}^3/\text{s}$) waarbij parameter ' Y ' gelijk is aan 1,4.

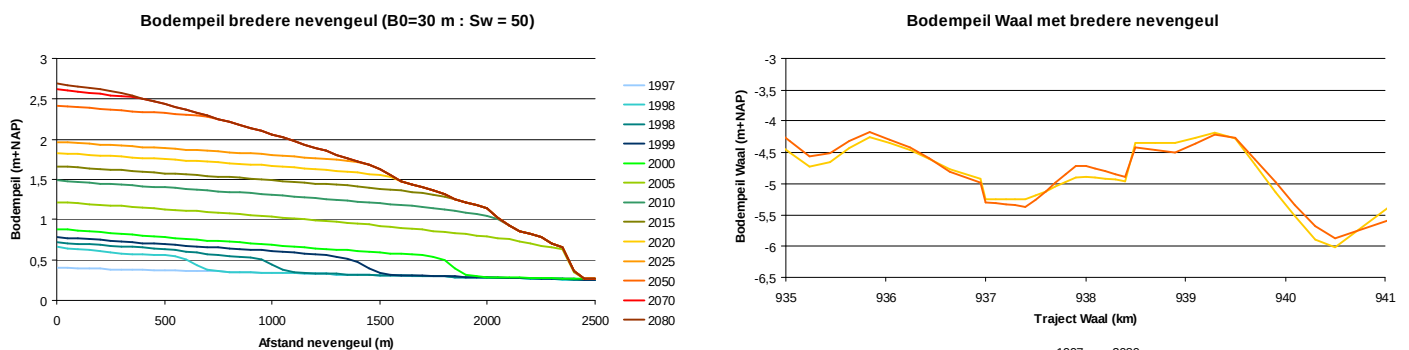
In situatie 'I' is de k_s waarde van de nevengeul verhoogd van 0,18 meter naar 0,25 meter (lichte toename in de stromingsweerstand). Dit resulteert erin dat de nevengeul nu sedimenteert over een grotere lengte van de nevengeul.

Situatie I: $Y = 1,4$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$



In situatie 'K' is de geulbodem-breedte en de sedimenttransport-breedte verhoogd in vergelijking met situatie A. In situatie A was de geulbodem-breedte ($B_{2_0,4m+NAP}$) gelijk aan 10 meter en de sedimenttransport-breedte (B_{s2}) gelijk aan 30 meter. In situatie B is de geulbodem-breedte ($B_{2_0,4m+NAP}$) gelijk aan 30 meter en de sedimenttransport-breedte (B_{s2}) gelijk aan 50 meter. Uit situatie K is gebleken dat, wanneer de geulbodem breedte en dus de sedimenttransport-breedte toeneemt de sedimentatiefront ook meer stroomafwaarts en in hoogte toeneemt. Het sedimentaanbod wordt dus iets groter dan de transportcapaciteit van de nevengeul. Dit is ook gebleken uit de analytische morfologische studie, waarbij een grotere B_2 zorgde voor een lagere evenwichtsdiepte en waardoor de sedimentatie front in hoogte moet toenemen. Door situatie A te vergelijken met situatie B is te concluderen dat een lichte vergroting van de geulbodem- en sedimenttransport-breedte geen grote invloed heeft op de morfologische ontwikkeling van de neven- en hoofdgeul.

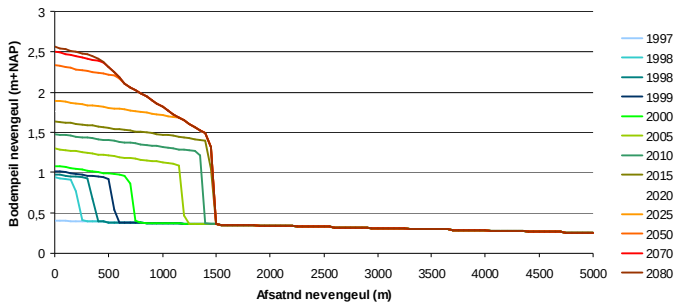
Situatie K: $Y = 1,4$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$



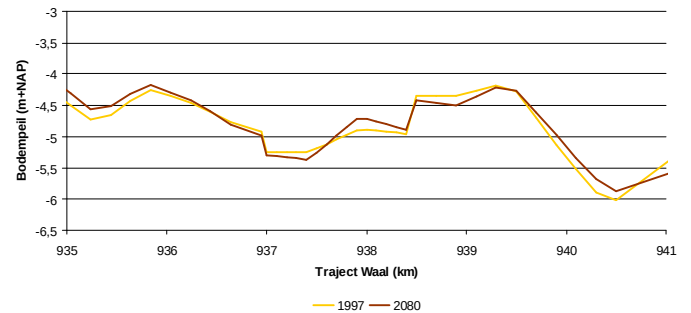
In situatie 'L' is de nevengeullengte vergroot van 2500 meter naar 5000 meter. Door situatie A weer te vergelijken met situatie B valt te concluderen dat de sedimentatie zicht minder ver stroomsafwaarts verplaatst naar de nevengeul. Dit is verklaarbaar doordat door een grotere nevengeullengte het verhang van de nevengeul lager wordt. Dit resulteert weer in een lagere stroomsnelheid, waardoor bijna al het sediment bovenstrooms in de nevengeul wordt afgezet dat vervolgens weer leidt tot hogere sedimentatiefront die zich minder snel stroomafwaarts verplaatst.

Situatie L: $Y = 1,4$; $\gamma_1 = 0,8$ en $\gamma_2 = 1$

Bodempeil lange nevengeul van 1997-2080

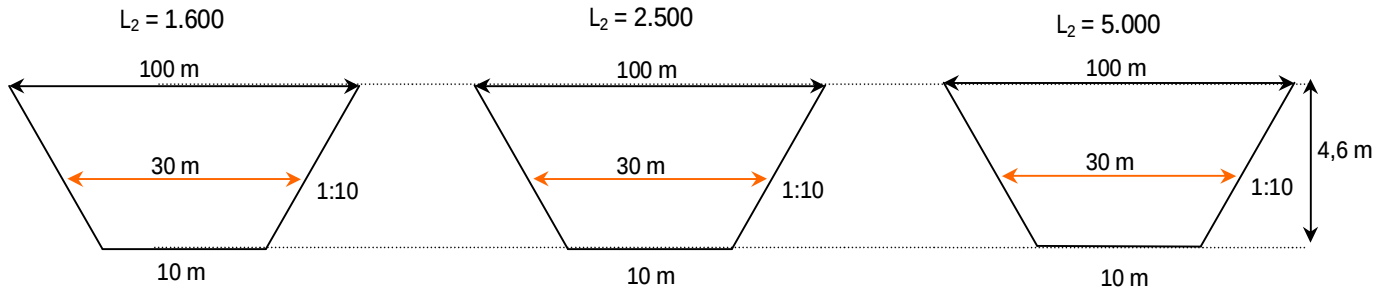


Bodempeil Waal (lange nevengeul) van 1997-2080

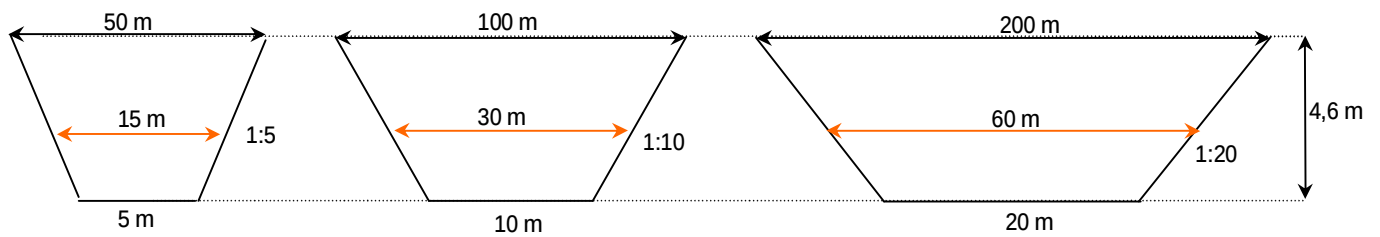


Appendix Q: Profielen voor gevoeligheid geometrie-parameters

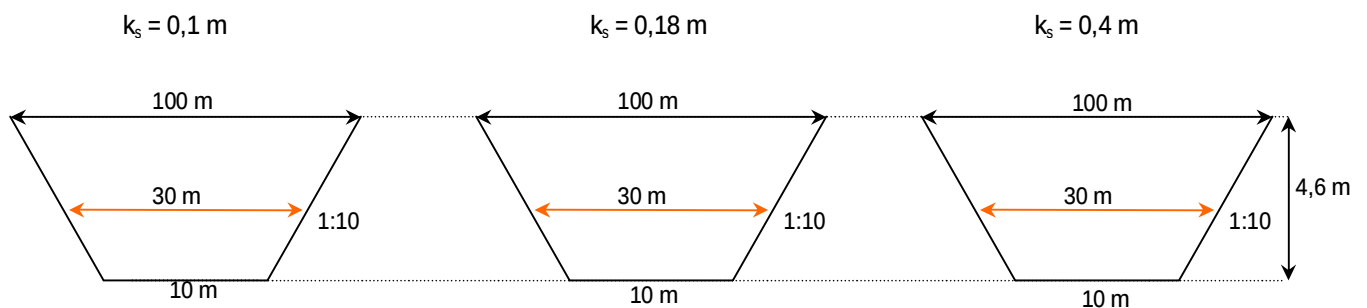
Lengte (L_2) nevengeul



Breedte (B_2) nevengeul



Stromingsweerstand (k_s) nevengeul



figuur 63: schematisatie van de verschillende ontwerpprofielen waarbij gevarieerd is in de lengte (L_2), breedte (B_2) en de stromingsweerstand (k_s) van de nevengeul.

Appendix R: Waarden bij berekening evenwichtsdieptes bij (L_2)

In deze tabellen is de procentuele verandering van het debiet en sedimenttransport weergegeven in een situatie waarbij de lengte van de nevengeul toeneemt. Uit deze tabellen kan gezien worden dat de evenwichtsdiepte in een kanaal stijgt wanneer de procentuele verandering in het sedimenttransport harder afneemt (sedimenttransport factor) dan de procentuele verandering van het debiet. Ook neemt de evenwichtsdiepte toe in een kanaal wanneer het de procentuele verandering van het debiet harder toeneemt dan de toename in het sedimenttransport in relatie met de sedimenttransport factor.

tabel 23

Nevengeul met $Y = 5$; $\gamma_2 = 2$									
Berekenen waarden uit parametrisatie						Procentuele verandering van parameters ($\Delta\%$)			
L_2 [m]	Q_2 [m ³]	Q_{s2} [m ³ /s]	Factor $Q_{s2}^{(-1/n)}$	h_{e2} [m]	u_2 [m/s]	Q_2 %	Q_{s2} %	Factor $Q_{s2}^{(-1/n)}$ %	u_2 %
250	246	0,0222	3,14	4,54	1,81	-	-	-	-
500	207	0,0122	3,76	4,56	1,51	-16,09	-44,99	19,66	-16,43
1.250	163	0,0042	5,19	4,97	1,09	-21,13	-65,89	38,12	-27,60
1.500	155	0,0033	5,57	5,09	1,02	-4,68	-21,16	7,40	-6,89
2.000	144	0,0022	6,25	5,29	0,91	-7,31	-31,92	12,24	-10,90
2.500	136	0,0016	6,85	5,46	0,83	-5,75	-26,22	9,56	-8,73
3.000	129	0,0013	7,39	5,61	0,77	-4,74	-22,22	7,84	-7,27
3.500	124	0,0010	7,88	5,74	0,72	-4,04	-19,27	6,64	-6,23
4.000	120	0,0009	8,33	5,86	0,68	-3,51	-17,00	5,76	-5,44
4.500	116	0,0007	8,75	5,97	0,65	-3,11	-15,21	5,08	-4,83
5.000	113	0,0006	9,15	6,06	0,62	-2,79	-13,75	4,54	-4,35
7.500	101	0,0004	10,87	6,45	0,52	-10,37	-43,56	18,74	-15,78
10.000	93	0,0002	12,28	6,75	0,46	-7,51	-33,48	13,02	-11,52

tabel 24

Hoofdgeul met $Y = 5$; $\gamma_2 = 2$									
Berekenen waarden uit parametrisatie						Procentuele verandering van parameters ($\Delta\%$)			
L_2 [m]	Q_1 [m ³]	Q_{s1} [m ³ /s]	Factor $Q_{s1}^{(-1/n)}$	h_{e1} [m]	u_1 [m/s]	Q_1 %	Q_{s1} %	Factor $Q_{s1}^{(-1/n)}$ %	u_1 %
250	1754	0,02083	3,20	6,61	0,89	-	-	-	-
500	1793	0,03080	2,84	6,01	1,00	2,26	47,90	-11,09	12,47
1.250	1837	0,0388	2,65	5,74	1,07	2,44	26,09	-6,73	7,21
1.500	1845	0,0397	2,63	5,73	1,08	0,41	2,27	-0,67	0,68
2.000	1856	0,0408	2,61	5,72	1,09	0,62	2,64	-0,78	0,78
2.500	1864	0,0414	2,60	5,72	1,09	0,45	1,44	-0,43	0,43
3.000	1871	0,0417	2,60	5,72	1,10	0,35	0,89	-0,26	0,27
3.500	1876	0,0420	2,59	5,73	1,10	0,28	0,59	-0,18	0,18
4.000	1880	0,0421	2,59	5,74	1,10	0,23	0,42	-0,13	0,13
4.500	1884	0,0423	2,59	5,74	1,10	0,20	0,31	-0,09	0,09
5.000	1887	0,0424	2,58	5,75	1,10	0,17	0,24	-0,07	0,07
7.500	1899	0,0426	2,58	5,77	1,10	0,62	0,65	-0,19	0,19
10.000	1907	0,0428	2,58	5,79	1,10	0,40	0,28	-0,08	0,08

tabel 25

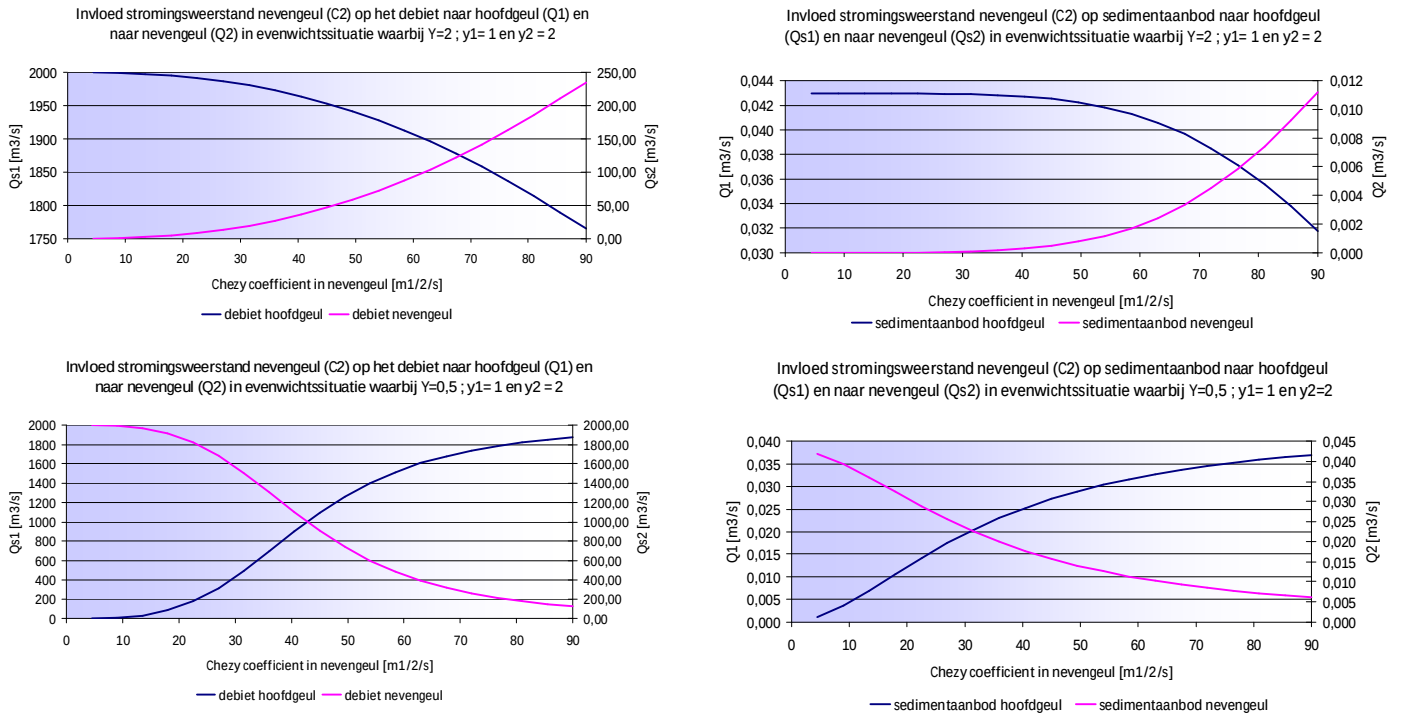
Nevengeul met $Y = 2$; $\gamma_2 = 2$									
Berekende waarden uit parametrisatie						Procentuele verandering van parameters ($\Delta\%$)			
L_2 [m]	Q_2 [m ³]	Q_{s2} [m ³ /s]	Factor $Q_{s2}^{(-1/n)}$	h_{e2} [m]	u_2 [m/s]	Q_2 %	Q_{s2} %	Factor $Q_{s2}^{(-1/n)}$ %	u_2 %
250	603	0,0339	2,76	9,80	2,05	-	-	-	-
500	308	0,0170	3,40	6,14	1,67	-48,97	-49,64	22,87	-18,62
1.250	110	0,0027	5,91	3,81	0,96	-64,37	-84,20	74,04	-42,54
1.500	88	0,0017	6,73	3,49	0,84	-19,44	-35,05	13,84	-12,16
2.000	63	0,0009	8,29	3,05	0,68	-29,21	-50,17	23,27	-18,87
2.500	48	0,0005	9,78	2,74	0,58	-23,71	-42,18	17,88	-15,17
3.000	38	0,0003	11,19	2,51	0,51	-19,95	-36,27	14,49	-12,65
3.500	32	0,0002	12,56	2,33	0,45	-17,21	-31,76	12,16	-10,84
4.000	27	0,0002	13,87	2,19	0,41	-15,14	-28,22	10,47	-9,48
4.500	23	0,0001	15,15	2,07	0,37	-13,50	-25,39	9,19	-8,42
5.000	20	0,0001	16,39	1,96	0,35	-12,19	-23,06	8,19	-7,57
7.500	12	0,0000	22,19	1,61	0,26	-39,45	-63,58	35,43	-26,16
10.000	9	0,0000	27,53	1,40	0,21	-30,02	-51,19	24,03	-19,38

tabel 26

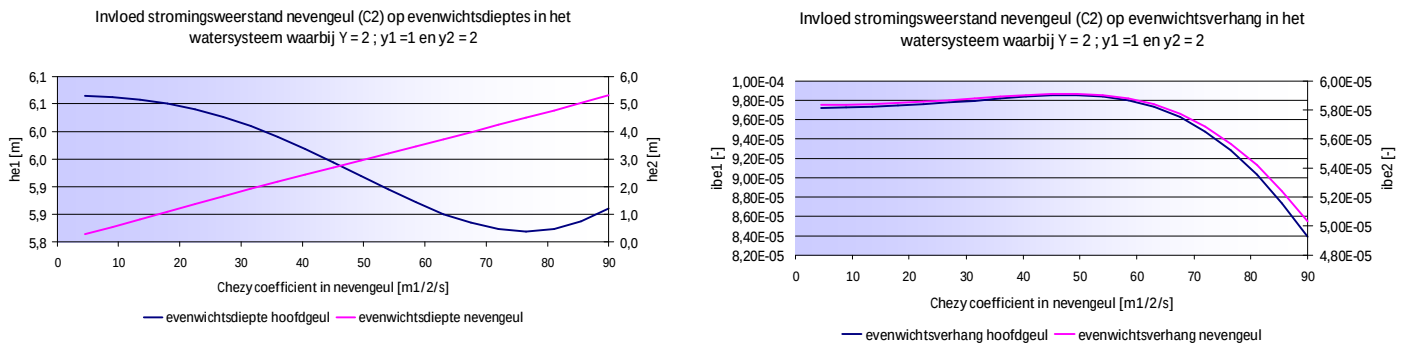
Hoofdgeul met $Y = 2$; $\gamma_2 = 2$									
Berekenen waarden uit parametrisatie						Procentuele verandering van parameters ($\Delta\%$)			
L_2 [m]	Q_1 [m ³]	Q_{s1} [m ³ /s]	Factor $Q_{s1}^{(-1/n)}$	h_{e1} [m]	u_1 [m/s]	Q_1 %	Q_{s1} %	Factor $Q_{s1}^{(-1/n)}$ %	u_1 %
250	1397	0,00914	4,10	6,74	0,70				
500	1692	0,02595	2,99	5,97	0,95	21,14	183,78	-26,89	36,78
1.250	1890	0,04031	2,62	5,85	1,09	11,71	55,32	-12,39	14,14
1.500	1912	0,04125	2,60	5,87	1,09	1,13	2,34	-0,69	0,70
2.000	1937	0,04213	2,59	5,91	1,10	1,35	2,13	-0,63	0,63
2.500	1952	0,04250	2,58	5,94	1,10	0,77	0,87	-0,26	0,26
3.000	1962	0,04268	2,58	5,96	1,10	0,49	0,43	-0,13	0,13
3.500	1968	0,04278	2,58	5,98	1,10	0,34	0,24	-0,07	0,07
4.000	1973	0,04284	2,58	5,99	1,11	0,24	0,14	-0,04	0,04
4.500	1977	0,04288	2,57	6,00	1,11	0,18	0,09	-0,03	0,03
5.000	1980	0,04291	2,57	6,01	1,11	0,14	0,06	-0,02	0,02
7.500	1988	0,04297	2,57	6,03	1,11	0,41	0,13	-0,04	0,04
10.000	1991	0,04298	2,57	6,04	1,11	0,19	0,04	-0,01	0,01

Appendix S: invloeden van parameters C_2 en B_2 op evenwichtssituaties

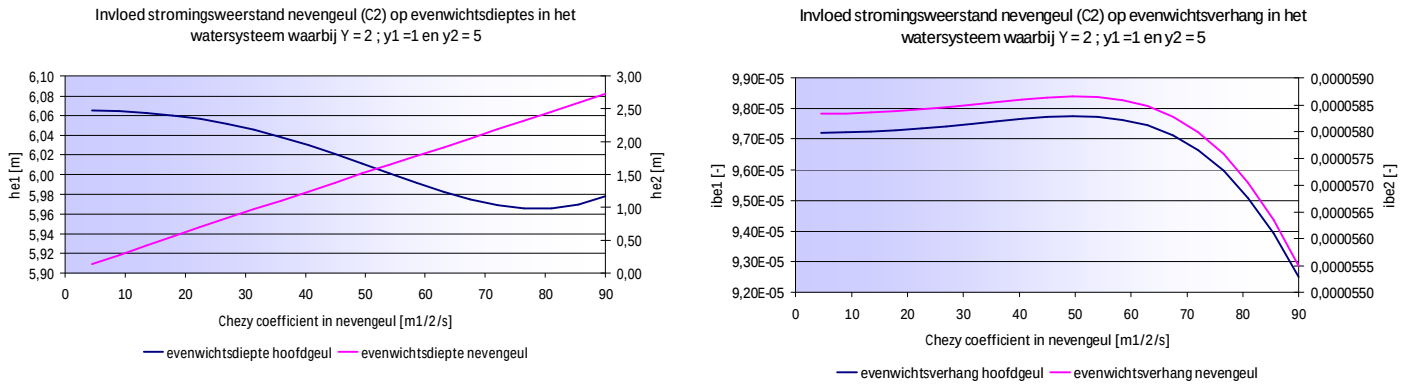
Invloed weerstand nevengeul (C_2) op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in het watersysteem.



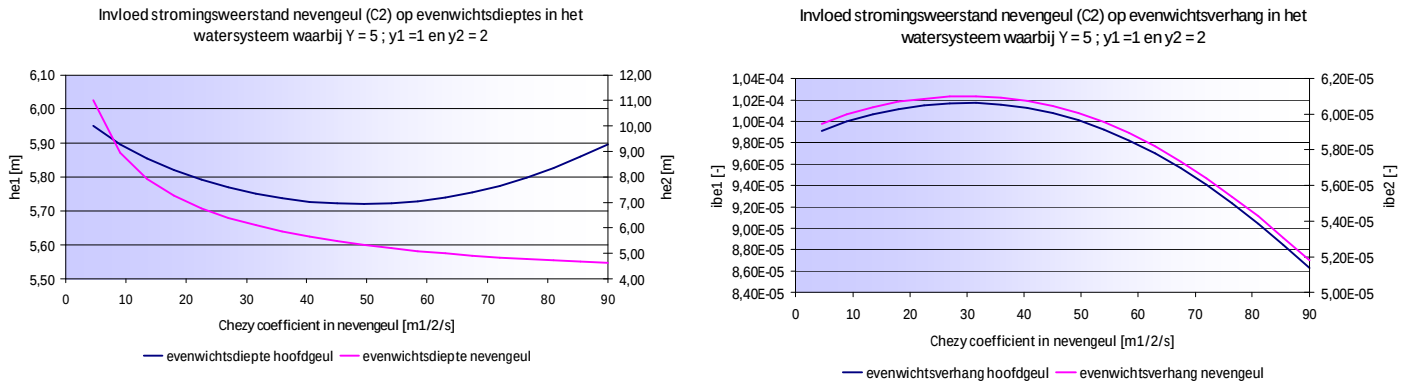
figuur 64: In bovenstaande grafieken is weergegeven dat het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul toeneemt in stabiele evenwichtssituaties ($Y > n/3$). In instabiele evenwichtssituaties ($Y < n/3$) neemt het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul af.



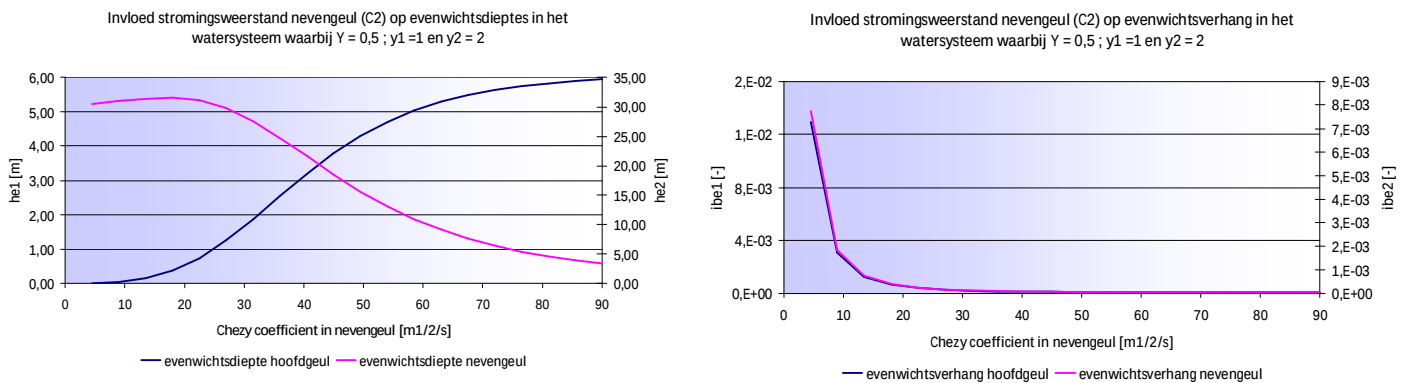
figuur 65: Invloeden van C_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y=2$ en $y_1=1$ en $y_2=2$



figuur 66: Invloeden van C_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 2$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 5$

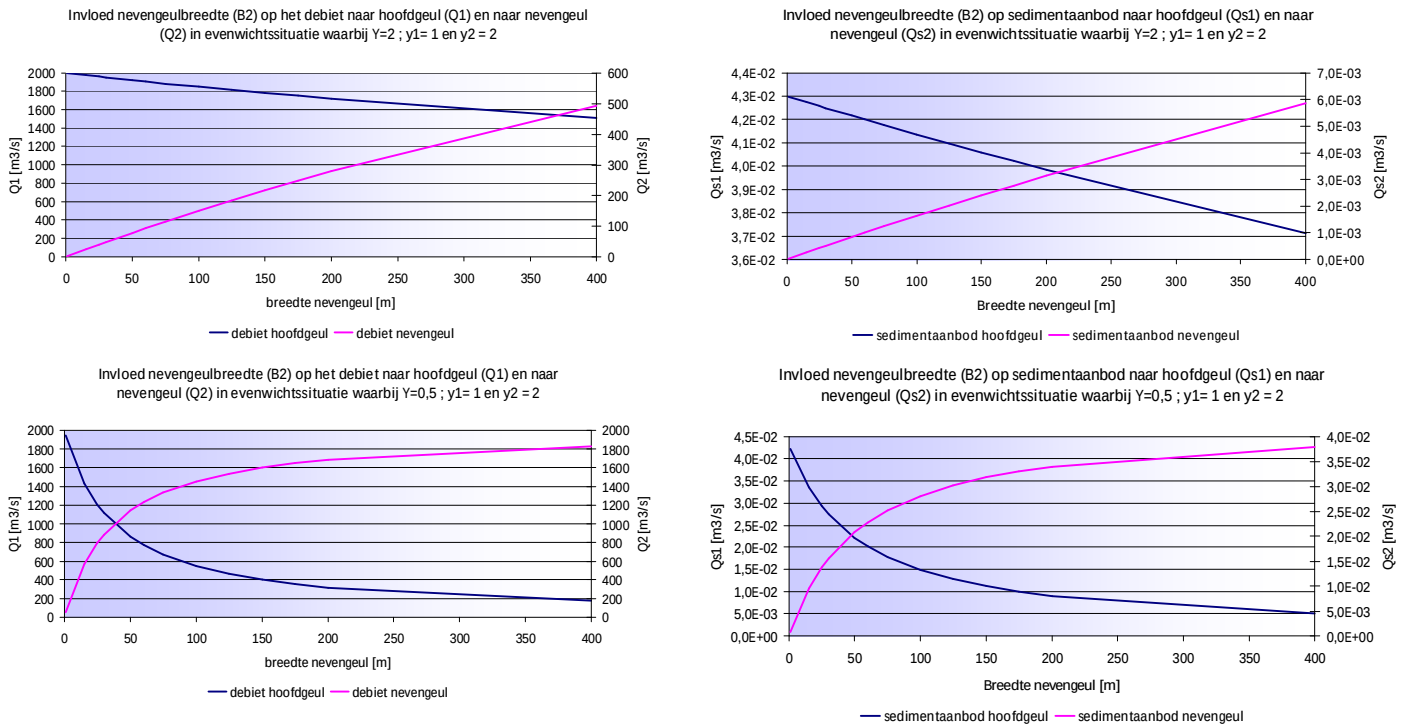


figuur 67: Invloeden van C_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 5$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$

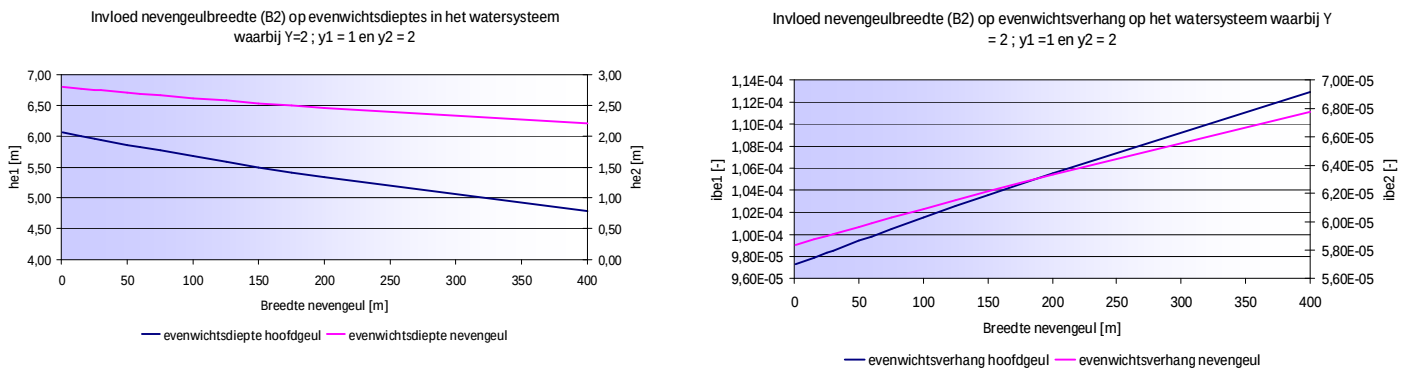


figuur 68: Invloeden van C_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 0,5$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$

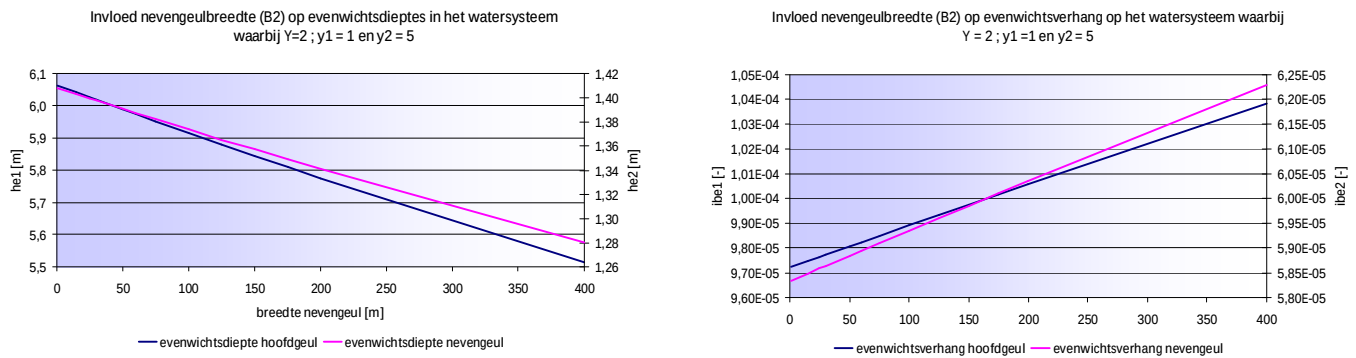
Invloed weerstand nevengeul (B_2) op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in het watersysteem.



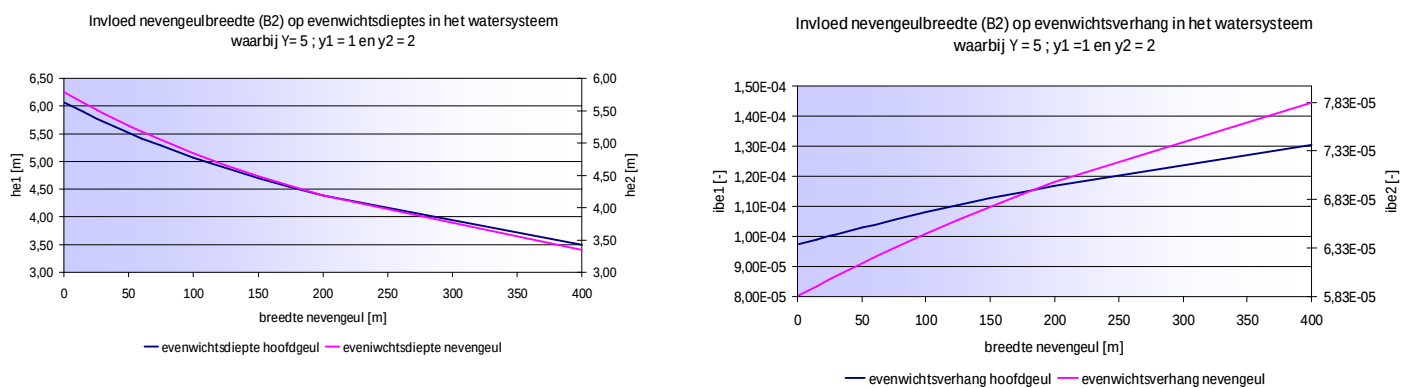
figuur 69: In bovenstaande grafieken is weergegeven dat het debiet en sedimenttransport naar de nevengeul toeneemt in stabiele evenwichtssituaties ($Y > n/3$) wanneer de breedte van de nevengeul toeneemt. In instabiele evenwichtssituaties ($Y < n/3$) neemt het debiet en sedimenttransport ook naar de nevengeul toe met toenemende breedte van de nevengeul.



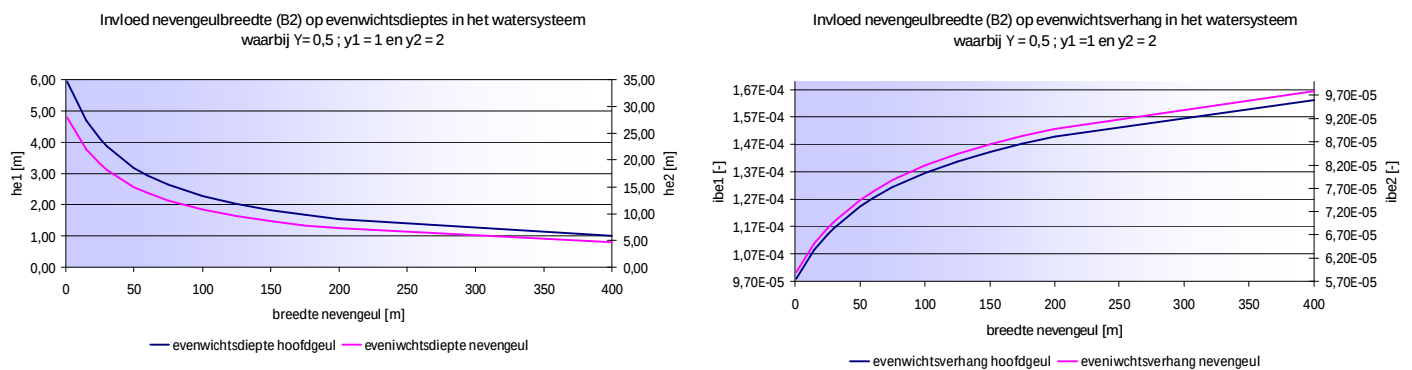
figuur 70: Invloeden van B_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y = 2$ en $y_1 = 1$ en $y_2 = 2$



figuur 71: Invloeden van B_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y=2$ en $y_1=1$ en $y_2=5$



figuur 72: Invloeden van B_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y=5$ en $y_1=1$ en $y_2=2$



Figuur 73: Invloeden van B_2 op evenwichtsdiepte en evenwichtsverhang in geval van $Y=0,5$ en $y_1=1$ en $y_2=2$

Appendix T: Effecten sedimentreducerende maatregelen (analytisch)

Naast de numerieke berekeningen worden onderstaand de twee randvoorwaarden, die benodigd zijn om erosie in het bovenstroomse deel van de nevengeul in de initiële situatie te verkrijgen, ook analytisch inzichtelijk gemaakt. Ten eerste moet de stroomsnelheid in de nevengeul groter zijn dan de aanvangstroomsnelheid in relatie met de 'kritieke Shieldsparameter. Alleen bij deze hogere stroomsnelheden kan een nevengeul sediment transporteren. Ten tweede moet de instroom van het sediment naar de nevengeul kleiner zijn dan de uitstroom van het sediment. Alleen wanneer aan deze twee randvoorwaarden wordt voldaan kan erosie in de nevengeul optreden. Dit is inzichtelijk gemaakt door voor de bovenstroomse dwarsdoorsnede van de nevengeul, waarbij al dan niet sedimentatie heeft plaatsgevonden, vergelijkingen op te stellen voor het sedimentaanbod en de transportcapaciteit van sediment in de nevengeul. Hierbij wordt verondersteld dat de sedimentatie over de gehele lengte van de nevengeul gelijkmatig plaatsvindt en dat het verhang (initiële situatie) dus constant blijft. Het debiet naar de nevengeul kan berekend worden met vergelijking (40), wanneer het waterpeil op het splitsingspunt bekend is bij een veronderstelde afvoer voor de moedergeul.

$$Q_2 = A_2 \cdot C_2 \cdot \sqrt{R_2 \cdot i b_2} \quad (40)$$

Aan de hand van dit waterpeil kan het natte oppervlak (A_2), hydraulische straal (R_2) en de stromingsweerstand (C_2) berekend worden, rekening houdend met de eventuele sedimentatie in de nevengeul. Het verhang is gelijkgesteld aan 0,0006 (zie paragraaf 6.2). Wanneer het debiet naar de nevengeul bekend is, kan het debiet naar de hoofdgeul berekend worden aan de hand van de waterbeweging, zoals beschreven in vergelijking 7 in paragraaf 4.2. Aan de hand van de splitsingspuntrelatie (26) in paragraaf 4.6, wanneer het sedimenttransport door de moedergeul (Q_{s0}) bij een zekere afvoer bekend is, kan de sedimentverdeling (Q_{s1in}/Q_{s2in}) berekend worden op het splitsingspunt met vergelijking 10. Hieruit volgt het sedimentaanbod (Q_{s2in}) naar de nevengeul. Aan de hand van vergelijking (16) en (18) kan de transportcapaciteit van het sediment van de nevengeul berekend worden.

$$Q_{si} = B_s \cdot \sqrt{g \cdot \Delta \cdot D_{50}^3} \cdot A \cdot \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \beta_u \cdot (\mu \cdot \theta_s - \theta_c)^{\alpha_u} \quad (16)$$

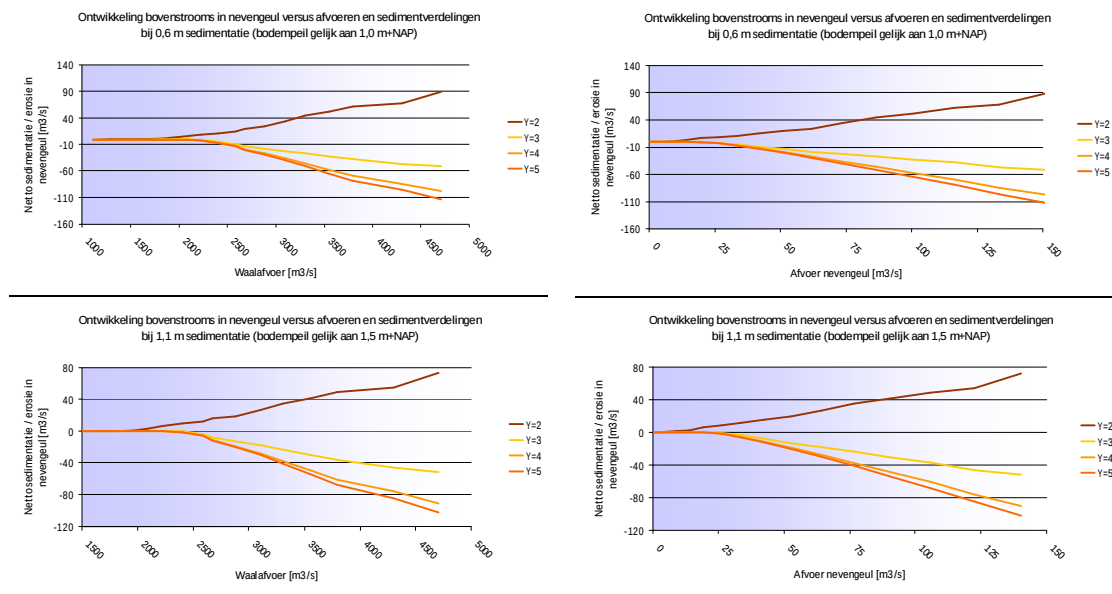
met:

$$\theta_{si} = \mu \cdot \frac{u^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot D_{50}} \quad (18)$$

In deze vergelijking van het sedimenttransport is alleen de stroomsnelheid (u) en de Chezy coëfficiënt (C) variabel, die vervolgens de Shieldsparameter (Θ_{s2}) bepalen. De 'ripple factor' (μ) is constant en is gelijk aan 0,7 (tabel 29). Ook de kritieke Shieldsparameter (Θ_{crit2}) is constant en is gelijk aan 0,025. Er kan alleen sedimenttransport in de nevengeul plaatsvinden wanneer de Shieldsparameter groter is dan de kritieke Shieldsparameter. In figuur 74 is de netto sedimentatie en erosie weergegeven, bij verschillende afvoeren door de moedergeul (Waal) bij verschillende sedimentverdelingen (parameter Y). De berekende waarden voor de achterliggende hydraulische en morfologische parameters, voor een situatie in de nevengeul waarbij 1,1 meter sedimentatie is opgetreden (1,5 m+NAP), zijn weergegeven in tabel 27 en tabel 28.

Uit figuur 74 blijkt eveneens dat de sedimentinstroom naar de nevengeul sterk gereduceerd moet worden om bovenstrooms erosie in de nevengeul te veroorzaken. De overgang tussen sedimentatie/erosie in de nevengeul bij de verschillende Y -waarden komt niet precies overeen met de numerieke analyses. Zo ontstaat er bij interventiemoment A met $Y = 2$ (figuur 47) bij de numerieke analyse toch lichte erosie bovenstrooms in de nevengeul. Dit kan verklaard worden doordat het debiet naar de nevengeul via de analytische benadering iets onderschat wordt ten opzichte van het SOBEK-RE model en dat het verhang in de nevengeul na sedimentatie niet veranderd. Daarnaast is in de analytische benadering af te leiden dat

de hoeveelheid erosie/sedimentatie in de nevengeul bij 1,1 meter aanzanding in de nevengeul iets kleiner is dan bij 0,5 meter aanzanding. Er treedt minder erosie op in de situatie van 1,1 meter aanzanding doordat er minder debiet naar de nevengeul wordt getransporteerd terwijl de doorstroombreedte groter is geworden als gevolg van de sedimentatie. Er treedt ook minder sedimentatie op, doordat er in deze situatie minder sediment naar de nevengeul wordt getransporteerd. Dit volgt uit splitsingspuntrelatie wanneer de afvoerdeling ongelijker wordt. Verder is duidelijk af te leiden dat er grote afvoeren door de moedergeul/nevengeul benodigd zijn om sterke erosie in de nevengeul te kunnen krijgen. Deze hogere afvoeren komen maar relatief weinig voor (figuur 26), waardoor het in de praktijk moeilijk wordt om grote hoeveelheid sediment op korte termijn te laten eroderen.



figuur 74: (Boven) ontwikkelingen bovenstrooms in nevengeul bij sedimentatie van 0,6 m (1,0 m+NAP) versus Waalafvoer en sedimentverdelingen. (Onder) ontwikkelingen bovenstrooms in nevengeul bij sedimentatie van 1,1 m (1,5 m+NAP) versus Waalafvoer en sedimentverdelingen.

tabel 27: Hydraulische waarden bij sedimentatie van 1,1 m (1,5 m+NAP) met een sedimentverdeling waarbij $Y = 5$

Waterpeil [m+NAP]	Q_0 [m ³ /s]	h_2 [m]	A_2 [m ²]	P_2 [m]	R_2 [m]	$C_2^{1/2}$ [m ^{1/2} /s]	Q_2 [m ³ /s]	Q_4 [m ³ /s]	Q_4/Q_2 [-]	u_2 [m/s]
1,75	1441	0,25	8,47	36,32	0,23	21,44	0,68	1440,71	2122,13	0,08
2,00	1632	0,50	18,15	41,22	0,44	26,42	2,46	1629,86	661,37	0,14
2,25	1826	0,75	29,05	46,11	0,63	29,22	5,22	1820,90	348,96	0,18
2,50	1969	1,00	41,17	51,01	0,81	31,15	8,92	1960,89	219,71	0,22
2,75	2097	1,25	54,50	55,91	0,97	32,63	13,60	2083,31	153,15	0,25
3,00	2224	1,50	69,06	60,80	1,14	33,83	19,28	2204,74	114,34	0,28
3,25	2405	1,75	84,83	65,70	1,29	34,83	26,00	2378,92	91,48	0,31
3,50	2586	2,00	101,82	70,59	1,44	35,69	33,81	2552,02	75,49	0,33
3,75	2677	2,25	120,02	75,49	1,59	36,46	42,74	2634,58	61,65	0,36
4,00	2884	2,50	139,45	80,38	1,73	37,14	52,83	2831,41	53,59	0,38
4,25	3105	2,75	160,09	85,28	1,88	37,75	64,14	3040,42	47,40	0,40
4,50	3303	3,00	181,94	90,18	2,02	38,32	76,71	3226,62	42,06	0,42
4,75	3550	3,25	205,02	95,07	2,16	38,84	90,57	3459,38	38,19	0,44
5,00	3797	3,50	229,31	99,97	2,29	39,32	105,78	3690,79	34,89	0,46
5,25	4304	3,75	254,82	104,86	2,43	39,77	122,38	4182,02	34,17	0,48
5,50	4706	4,00	281,55	109,76	2,57	40,19	140,40	4565,33	32,52	0,50

tabel 28: Morfologische waarden bij sedimentatie van 1,1 m (1,5 m+NAP) met een sedimentverdeling waarbij $\gamma = 5$

Waterpeil [m+NAP]	Q_{50}	$\theta_{s2} [-]$	$\theta_{crit2} [-]$	$\varphi_{s2} [-]$	$Q_{s2} [m^3/s]$	$F [-]$	$Q_{s2lin} [m^3/s]$	$Q_{s2in} [m^3/s]$	$S/E [m^3/s]$	$S/E [m^3/dag]$
1,75	0,02	0,01	0,025	0,00	0,00E+00	3,54E+12	2,06E-02	5,83E-15	5,83E-15	0,00
2,00	0,03	0,01	0,025	0,00	0,00E+00	1,04E+10	2,99E-02	2,87E-12	2,87E-12	0,00
2,25	0,04	0,02	0,025	0,00	0,00E+00	4,25E+08	4,11E-02	9,66E-11	9,66E-11	0,00
2,50	0,06	0,02	0,025	0,00	0,00E+00	4,21E+07	5,84E-02	1,39E-09	1,39E-09	0,00
2,75	0,07	0,03	0,025	0,00	0,00E+00	6,92E+06	6,69E-02	9,66E-09	9,66E-09	0,00
3,00	0,08	0,03	0,025	0,00	0,00E+00	1,61E+06	7,53E-02	4,69E-08	4,69E-08	0,00
3,25	0,09	0,04	0,025	0,12	1,93E-05	5,27E+05	8,55E-02	1,62E-07	-1,92E-05	-1,66
3,50	0,10	0,04	0,025	0,42	6,94E-05	2,01E+05	9,56E-02	4,75E-07	-6,89E-05	-5,95
3,75	0,10	0,05	0,025	0,86	1,42E-04	7,32E+04	1,00E-01	1,37E-06	-1,40E-04	-12,13
4,00	0,11	0,05	0,025	1,42	2,35E-04	3,63E+04	1,06E-01	2,91E-06	-2,32E-04	-20,06
4,25	0,12	0,06	0,025	2,11	3,49E-04	1,97E+04	1,20E-01	6,08E-06	-3,43E-04	-29,64
4,50	0,13	0,06	0,025	2,93	4,84E-04	1,08E+04	1,28E-01	1,18E-05	-4,72E-04	-40,82
4,75	0,13	0,07	0,025	3,88	6,41E-04	6,68E+03	1,32E-01	1,98E-05	-6,21E-04	-53,64
5,00	0,14	0,07	0,025	4,96	8,19E-04	4,25E+03	1,37E-01	3,23E-05	-7,87E-04	-67,97
5,25	0,16	0,07	0,025	6,17	1,02E-03	3,83E+03	1,57E-01	4,09E-05	-9,79E-04	-84,56
5,50	0,18	0,08	0,025	7,53	1,24E-03	2,99E+03	1,79E-01	6,01E-05	-1,18E-03	-102,22

tabel 29: Constante parameters en waarden die gebruikt zijn bij berekening

Constante parameters	Waarde
Aanlegdiepte initieel [m+NAP]	0,4
Geulbodem initieel [m]	10
Taludhelling [-]	9,74
Aanzadingsniveau [m+NAP]	1,5
Aanzandinghoogte [m]	1,1
Geulbodembreedte [m]	31,4
Sedimenttransporterende breedte B_s [m]	30
$G [m/s^2]$	9,81
$E [-]$	0,4
$k_s [m]$	0,18
$\Delta [-]$	1,65
$D_{50} [m]$	0,00119
$\theta_{crit} [-]$	0,025
$\alpha_u [-]$	1,5
$\beta_u [-]$	8
$\mu [-]$	0,7