

Functioneel kribontwerp op riviertak- en uiterwaardniveau

Samenvatting	3
Hoofdstuk 1 Inleiding	
1.1 Aanleiding	5
1.2 Doelstelling	5
1.3 Werkwijze	5
Hoofdstuk 2 Kribfuncties	
2.1 Inleiding	7
2.2 Functionele eisen	7
2.3 Functioneel beheer	8
2.4 Huidige processen	9
2.5 Conclusies	11
Hoofdstuk 3 Inventarisatie huidige ontwikkelingen Waal	
3.1 Inleiding	13
3.2 Grootschalige bodemveranderingen in het zomerbed	13
3.3 Veranderingen in het systeem	15
3.4 Invloed van de randen op het zomerbed	18
3.5 Structurele hoogwatereffecten	19
3.6 Lange termijn ontwikkelingen van de oeverlijn	20
3.7 Huidige afvoerregulering	22
3.8 Beheer en onderhoud	23
3.9 Conclusies	26
Hoofdstuk 4 Inventarisatie huidige kribparameters	
4.1 Inleiding	29
4.2 Vormgeving kribkop	30
4.3 Onderlinge kribafstand	31
4.4 Oriëntatie van kribben	33
4.5 Kruinhoogte	33
4.6 Conclusies	34
Hoofdstuk 5 Normalisatie t.b.v. de scheepvaart	
5.1 Inleiding	37
5.2 Model voor grootschalige morfologie	38
5.3 Relatie kruinhoogte en zomerbedmorfologie	39
5.4 Lokale optimalisatie	40
5.5 Conclusies	42
Hoofdstuk 6 Afvoercapaciteit	
6.1 Inleiding	43
6.2 Overlaatformulering	43
6.3 Invloed van het dwarsprofiel	44
6.4 Conclusies	46
Hoofdstuk 7 Morfodynamiek van oeverzones	
7.1 Inleiding	49
7.2 Huidige situatie	50
7.3 Kribvakken en de sedimenthuishouding	53
7.4 Conclusies	55
Hoofdstuk 8 Belangrijkste conclusies en ruimtelijk kribontwerp	
8.1 Inleiding	57
8.2 Ontwerpfilosofie	57
8.3 Ruimtelijk ontwerp op riviertak niveau	58
8.4 Riviertak gemiddeld ontwerp	61
8.5 Ruimtelijk ontwerp op rivierbreedte niveau	62
8.6 Functie eisen innovatieve kribben	63

Literatuur	67
Bijlage A Relatie tussen vaarwegprofiel en gemiddelde waterdiepte	71
Bijlage B Analytisch model grootschalige morfologie	73
Bijlage C Schatting bodemverandering door lokale kribkruinverlaging	77
Bijlage D Invloed afvoer en sedimentverdeling op evenwichtsbodemhelling.	79

Samenvatting

In het huidig en toekomstig rivierbeheer spelen kribben een belangrijke rol. Het functioneren van kribben is echter niet altijd eenduidig te vertalen in kenmerkende kribparameters. In deze verkenning wordt een inventarisatie gemaakt van gewenste kribfuncties en relevante ontwikkelingen in het rivierbeheer van de Waal. Op basis hiervan wordt voor verschillende riviertrajecten een functioneel ontwerp op rivierniveau (circa 50 km) geformuleerd en uitgewerkt in een ruimtelijk ontwerp. Dit "gemiddelde kribontwerp" kan vervolgens dienen voor een optimalisatie, die is toegesneden op lokale condities; een kribontwerp op uiterwaardniveau (aantal kribben over een oeverlengte van circa 5 km). Voor de conclusies wordt verwezen naar de afzonderlijke hoofdstukken en het ruimtelijk ontwerp in Hoofdstuk 8.

De hoofdlijn van het rapport is als volgt. De uitgangspunten van een rivierniveau gemiddelde ruimtelijk ontwerp zijn onveranderde normaallijnen en voldoende zichtbaarheid van de belijning. De huidige kriboriëntatie en onderlinge kribafstand worden voor gesloten kribben als optimaal verondersteld. De oplossingsruimte voor een functioneel kribontwerp (op rivierniveau) wordt afgebakend door

- maximale concentratie van de OLR-afvoer tussen de normaallijnen
- geen toename van opstuwing onder maatgevende condities
- geen afname van de stroomgeleiding onder gemiddelde condities
- geen ontoelaatbare afname van de oeversbeschermt
- geen versterking van de lange termijn bodemontwikkeling

Op de BovenWaal en op de MiddenWaal tot km 910 (bodemdaling gebied) lijkt er ruimte voor maximaal 2 m verlaging van de kribkruinen, zonder grote compenserende maatregelen voor grootschalige morfologische effecten. Naast kruinverlaging lijkt ook kribvaksuppletie een goede optie voor een verbeterde stroomgeleiding. Benedenstrooms van km 910 (sedimentatie gebied) lijkt compensatie voor kruinverlaging (bv. kribverlenging) wel nodig. Als hiervoor (kribverlenging) geen ruimte binnen de normaallijnen is, dan lijken veranderingen in het rivierniveau-gemiddelde kribontwerp niet relevant.

Met het rivierniveau gemiddelde ontwerp als uitgangspunt kan worden gezocht naar een lokale optimalisatie op uiterwaardniveau. Bij deze lokale optimalisatie (van kribseries van ongeveer 5 km oeverlengte) lijkt de invloed van het kribontwerp op de lokale bodemligging veranderingen groter te zijn. De invloed van de voorgestelde rivierniveau-gemiddelde verlaging op huidige (en nieuwe) lokale knelpunten kan met WAQUA redelijk geïnventariseerd worden. In dit rapport zijn een aantal voorbeelden van lokale optimalisatie gegeven op lokaties met notoire scheepvaartknelpunten.

Van grote invloed op het presteren van aangepaste kribben is onder andere de onbekende hoogteligging van de kribvakbodem en de veranderde intensiteit van door scheepvaart opgewekte waterbeweging. Vanwege dergelijke onzekerheden is een proef met kleinschalige kribverlaging aan te bevelen. De inventarisatie met WAQUA en de proef kan vervolgens een strategie van gefaseerde uitvoering ondersteunen.

Het functioneel en ruimtelijk ontwerp is in dit rapport losgekoppeld van het kribontwerp op instantaan niveau (100 m), wat is gericht op lokale processen rondom de krib. Hiervoor wordt verwezen naar het op het moment van schrijven lopende onderzoek "Innovatieve Kribben" van DWW. Wel zijn een aantal aanbevelingen gedaan, onder andere ten aanzien van afvoerregulerende effecten van het dwarsprofiel. Een analyse van rivierkundige effecten op dit niveau wordt enigszins beschreven in Sieben (2002).

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Uit overleg met DON (DWW, 2001) is gebleken dat hiaten in de kennis van het functioneren van kribben langs rivieren kunnen leiden tot onzekerheid in met name

- de bepaling van een optimale kruinhoogte

In het bovenrivierengebied zijn de huidige kribben te hoog, hetgeen leidt tot onnodige weerstand tijdens hoogwaters. In het kader van Ruimte voor de Rivieren het verlagen van kribben daarom een potentiële maatregel. In hoeverre de kruin verlaagd kan worden is echter onduidelijk.

- de sedimenthuishouding van kribvakken

De passage van een duwstel resulteert vaak in een sterke stroming vanuit een kribvak naar de rivier, hetgeen kan leiden tot erosie van kribvakken, terugschrijdende oeverlijnen en achterloopse kribben, en wellicht sedimentatie in het zomerbed.

- een optimaal onderhoudsstrategie

Met een functioneel ontwerp van kribben kan een optimale combinatie van onderhouds- en aanlegkosten worden bepaald. Echter, de meest frequente faalmechanismen (achterloopsheid, verstelling kribkop en kruinverzakking) zijn moeilijk te voorspellen. Bovendien is het effect hiervan op het functioneren van de krib onbekend.

In opdracht van de Directie Oost-Nederland (DON), voert de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) een onderzoek uit naar een innovatief kribontwerp, dat moet leiden tot een beter functioneren van kribben en tot een betere voorspelling van het te verwachten onderhoud bij een gegeven belastingspectrum. Dit rapport is een onderdeel van het DWW-onderzoek is getiteld "Innovatief ontwerp kribben" en is gericht op

- het maken van een *functioneel* kribontwerp, inclusief een definitie van wensen en eisen.
- het genereren van alternatieve kribontwerpen

In een vervolgfase van het DWW-onderzoek zal voor een gekozen kribontwerp een indicatieve effectbepaling worden uitgevoerd, op basis van de in dit rapport geformuleerde functionele eisen (Sieben, 2002).

Voor dit DWW onderzoek staat de definitie van een min of meer generiek functioneel en ruimtelijk kribontwerp centraal, op basis van rivierkundige eisen. Om een dergelijk ontwerp te kunnen inpassen in het huidige en toekomstige rivierbeheer is daarbij een inventarisatie van relevante ontwikkelingen langs de Waal nodig. Deze inventarisatie, wordt ook in dit rapport beschreven, en wordt uitgevoerd voor de spankrachtstudies van de Waal.

1.2 Doelstelling

Uitgangspunt voor deze studie is de volgende vraag

hoe kan een ander ontwerp van kribben bijdragen aan waterstandsverlagingen onder maatgevende condities, met behoud of verbetering van de normalisering van de hoofdgeul.

Er worden op basis van functionele eisen rivierkundige ontwerpprincipes beschreven die kunnen worden uitgewerkt tot een beperkt aantal ruimtelijke kribontwerpen. Dit vergt een nadere formulering van functionele eisen op twee relevante lengteschalen:

- riviervak niveau (jaargemiddeld, grootschalig)
- uiterwaardniveau (hoogwatereffecten, kleinschalig)

1.3 Werkwijze

Gestart wordt met een beschrijving van de belangrijkste functies van kribben (Hoofdstuk 2). In Hoofdstuk 3 wordt de huidige morfologische ontwikkeling van de Waal geschetst. Daarna wordt met behulp van een

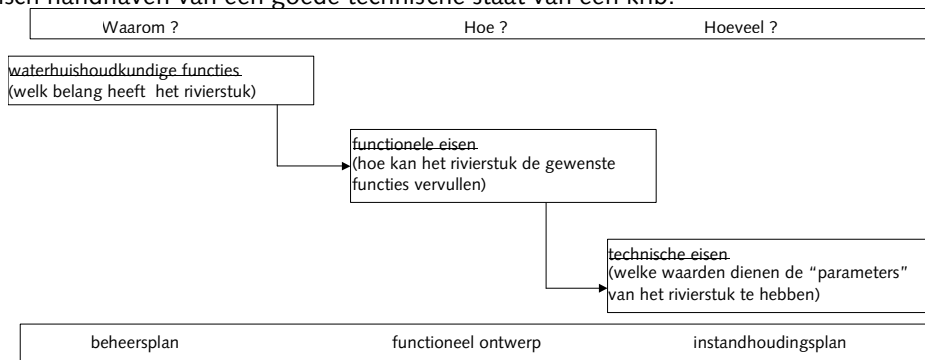
ruimtelijk ontwerp, een kwalitatieve beschrijving gegeven van de belangrijkste kribparameters (Hoofdstuk 4). Als deze inventarisatie is gedaan, wordt vervolgens voor de functies normalisatie t.b.v. de scheepvaart (Hoofdstuk 5); afvoer van water (Hoofdstuk 6) en afvoer van sediment (Hoofdstuk 7) een aantal aspecten beschouwd die kunnen worden uitgewerkt in relevante functionele eisen. In Hoofdstuk 8 wordt op basis van de verschillende schaalniveau's, en voor een beperkt aantal karakteristieke rivierstukken, een aantal ruimtelijke ontwerpen verder uitgewerkt.

Er is dankbaar gebruik gemaakt van opmerkingen van ir M. van der Wal (DWW), ing. W.J. van den Anker (DON-ANN), W.G.M. Verhoeven (DON-ANN), ir M.H.I. Schropp (RIZA) en dr W.B.M. ten Brinke (RIZA). De inhoudelijke verantwoordelijkheid ligt bij de auteur.

Hoofdstuk 2 Kribfuncties

2.1 Inleiding

Uitgangspunt voor een functioneel kribontwerp is enerzijds een globale definitie van de gewenste situatie op basis van rivierfuncties (ontleend aan het Beheersplan Rijkswateren), en anderzijds een eenvoudige beschrijving van *fysische processen*. In dit hoofdstuk worden daarom de belangrijkste *functionele* eisen, en de relevante *fysische* processen op een rij gezet. De functies van een krib kunnen worden afgeleid uit het beheersplan. Deze functies ("wat") kunnen worden vertaald in functie-eisen ("hoe") en vervolgens in technische eisen ("hoeveel"). Een dergelijke benadering voor kribben en oevers is uitgewerkt in Ariëns *et al.* (1994). Vanwege de complexiteit van rivierbeheer is in een dergelijke functionele benadering op dit moment nog sprake van een hiaat tussen *kwalitatieve* functie-eisen en de *kwantitatieve* technische eisen. Het ontwerp en lange-termijn beheer van oevers en kribben zou gericht moeten zijn op het instandhouden van functies die aan het rivierstuk worden gesteld. Het dagelijks beheer en onderhoud is voornamelijk gericht op het economisch handhaven van een goede technische staat van een krib.



Figuur 2.1 Definitie van rivierbeheer

2.2 Functionele eisen

In de huidige situatie zijn de belangrijkste kribfuncties gericht op afvoer van water en sediment, normalisatie ten behoeve van de scheepvaart en oeverbescherming. Volgens Ariëns *et al.* (1994) kunnen ten aanzien van oevers en kribben de volgende functies en functie-eisen worden geformuleerd.

waterhuishoudkundige functie	Functie-eisen
Afvoer water, sediment en ijs	-instandhouden van hoofdgeul met voldoende breedte en diepte, ook bij en na een hoogwater -stromingsweerstand laag houden door opstuwing van struikgewas beperken -tegengaan van een vlechtende of meanderende rivier door stroomconcentrerende werking van kribben
Hoofdtransportas	-voldoende diepe vaargeul, dus voldoende sedimentafvoer door stroomconcentrerende werking van kribben -voldoende zicht van scheepvaart in bochten, dus geen hinder door begroeiing op oevers -veilige scheepvaartgeleiding door aanduiding scheepvaartgeul m.b.v. kribbakens en zichtbaarheid oeverlijn tijdens hoogwater -voorzieningen overnachtings/aanleg/vluchtplaatsen
Hoofdvaarweg	Zie bij hoofdtransportas
Recreatievaart	Zie bij hoofdtransportas
Natuur en landschap	-inrichting naar oeverdoeltype waarbij streefbeeld zoveel mogelijk wordt behaald -gebruik maken van begroeiingsmogelijkheden -gebruikmaken van gebiedseigen natuurlijke materialen
Reg. Watervoorziening	-geen gebruik maken van schadelijke stoffen i.v.m. uitloging
Beroepsvisserij	-negatieve invloed gebruikte materialen op waterkwaliteit voorkomen -zo goed mogelijk voldoen aan rust-, schuil-, foerageer- en eventueel kraamfunctie
Oeverrecreatie en sportvisserij	-type verdediging bestand tegen o.a. vandalisme -oever moet toegankelijk zijn -oever moet ingericht zijn voor recreatie en sportvissen -zo goed mogelijk voldoen aan rust-, schuil-, foerageer- en eventueel kraamfunctie
Drinkwatervoorziening	-negatieve invloed gebruikte materialen op waterkwaliteit voorkomen
Koelwater energiecentrales	-geen verontreinigd, sedimenthoudend water bij inlaat -geen beschadiging oevers door belastingverhoging bij inlaat
Waterkrachtcentrales	-rekening houden met gewijzigde waterstanden en begeleiding van drijfvuil
Landbouw op oevers en in uiterwaarden	-drinkplaatsen voor vee -voorkomen aftrappen en vraat door vee d.m.v. het aanbrengen van afrasteringen
Onderdeel waterkering	-voorkomen schade aan de waterkering

Tabel 2.1 Samenvatting functie-eisen voor oevers en kribben door Ariëns *et al.* (1994).



Fig. 2.1-a Fixatie oeverlijn (Bisonbaai stroomopwaarts, Waal km 878, Meetkundige Dienst, 1995)



Fig. 2.1-b Stroomgeleiding, (De Kop Herenwaarden, Waal km 921, Meetkundige Dienst, 1995)



Fig. 2.1-c Fixatie oeverlijn (Broomwaard stroomopwaarts, Waal km 939, Meetkundige Dienst, 1995)



Fig. 2.1-d Stroomgeleiding, (Broomwaard, Waal km 940, Meetkundige Dienst, 1995)

2.3 Functioneel beheer

De functie eisen zijn niet alleen van belang voor een functioneel ontwerp, maar ook voor een op functies gebaseerd rivierbeheer. De functie-eisen voor de afvoer van water kunnen worden vertaald in technische eisen (kwantitatieve criteria) waarmee (indirect) beoordeeld wordt of een rivierstuk voldoet aan de functie-eisen, en of ingrijpen (uitstellen of plegen van onderhoud/herstellen i.v.m. gewijzigd beleid/verloederen/..) nodig is (instandhoudingsplan).

De technische staat van een krib is de mate waarin aan de technische eisen wordt voldaan. Deze technische staat wordt tijdens inspecties beoordeeld. Dit betekent dat voor een op functies gebaseerd beheer, *representatieve* parameters gedefinieerd worden (zoals helling of hoogte kribkop en verplaatsingen in de oeverlijn) waarmee efficiënt (indirect) kan worden gecontroleerd of aan de functionele eis wordt voldaan. De beoordeling vergt niet alleen een *momentopname* van de conditie, maar ook een *voorspelling* van veranderingen in de technische staat, en een inschatting van het risico op functieverlies. Een op functies gebaseerd rivierbeheer vergt dus :

- definitie van de "technische staat" met snel te bepalen karakteristieke parameters
- definitie van richtlijnen ter beoordeling van de "technische staat"
- voorspelling van veranderingen in de "technische staat"
- inschatten van het risico op functieverlies t.g.v. de huidige/verwachte "technische staat"
- vertalen van ingrepen (onderhoud) en verwacht schade verlies in vergelijkbare (economische) eenheden

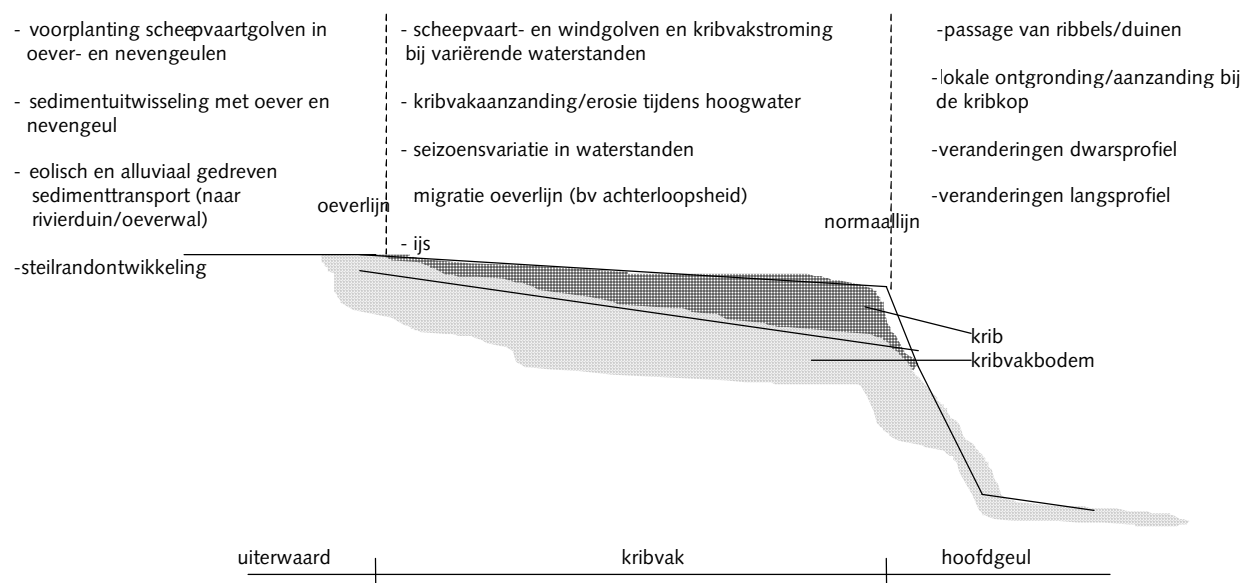
Nota bene; de fysieke relatie tussen sterkte en belasting (voor de verwachte situaties) worden in een beheerderschecklist vaak indirect beschouwd door drempelwaarden te definiëren voor de karakteristieke kribparameters (bv maximale waarde voor kribkophelling, maximale oeverlijnverplaatsing, maximaal oppervlak van instabiele stortsteen). Een dergelijke afgeleide benadering is noodzakelijk om efficiënt te kunnen beheren, maar kan in sommige gevallen te zware claim leggen op de beschikbare kennis (zowel theoretisch als empirisch). Bovendien kan een optimale technische staat afwijken van een optimaal functioneren.

Een dergelijk procédé is terug te vinden in het instandhoudingsplan. Op dit moment lijkt er voor een aantal faalmechanismen onvoldoende theoretische kennis te zijn voor een voldoende betrouwbaar causaal verband tussen technische staat en het functioneren van de krib (bv vaarweg veranderingen t.g.v. achterloopsheid, of vorm, lokatie en diepte van ontgrondingen en de kribkopvormgeving). Nader onderzoek en een betere ontsluiting van beheerderservaring en -waarnemingen is hierbij onmisbaar.

In deze verkenning zullen functie-eisen worden uitgewerkt in een ruimtelijk ontwerp, maar dit ruimtelijk ontwerp wordt niet gedimensioneerd. Er worden dus ook geen drempelwaarden in sterkte-parameters (zoals afmeting en gradatie van stortsteen) bepaald (technische eisen), hoewel de behoefte hieraan groot is.

2.4 Huidige processen bij kribben

In Tabel 2.2 wordt een overzicht gegeven van te verwachten fysieke processen, welke relevant kunnen zijn voor het ontwerp van een oeverbelijning met kribben. Deze fysieke processen betreffen in deze verkenning alleen hydraulica en morfologie (abiotische parameters). Een eerste inventarisatie heeft geleid tot het overzicht in Fig.2.2.



Figuur 2.2 Inventarisatie belangrijkste processen in de oeverzone van een typisch dwarsprofiel.

De processen kunnen worden gerangschikt met behulp van een karakteristieke tijdschaal die betrekking heeft op de *duur* van het proces (dit is niet per definitie gelijk aan de tijdschaal van de resulterende morfologische veranderingen). In Tabel 2.2 is deze indeling gevolgd, en is een aanzet gegeven voor de formulering van de bijbehorende technische eisen.

Oorzaak	duur	Proces	Effect	Technische eis
lokaal verhoogde turbulentie bij kribkop	s	Ontgronding bij kribkop Stationaire bodemvormen in zomerbed interactie met vrije bodemvormen (duinen) dissipatie energie	instabiliteit kribben aantasting vaarwegprofiel verandering afvoercapaciteit (bodemruwheid)	Voldoende funderingsdiepte Handhaven minimale vaarwegprofiel
scheepvaartgolven in geulen /kribvak	min	Fluctuatie stroming en waterstand Golf- en stromingaanval op oever Golf- en stromingaanval op constructies	Verstoring (aquatische) ecologie Afvoer naar nevengeul oevermigratie onderhoud	beperken fluctuaties aanpassen afvoerregelwerk nevengeul (lagere kruin) oeverbescherming stabiliteit kriblichaam
Kribvakstroming (circulatie)	min	- ondersteuning uniform stroombeeld - sedimentaanbod aan nevengeulen -uitwisselingssnelheid van zwevend sediment (en verontreinigingen)	normalisatie van hoofdgeul duurzaamheid inrichting morfodynamica kribvakbodem (en interactie met hoofdgeul)	optimale verhouding kriblengte en onderlingekribafstand
Getij	½ dg	Zoutindringing	Beperken verzilting Veranderingen in tij-gemiddelde transportcapaciteit	optimale kriblengte en -afstand normaalbreedte
Hoogwater	wk	Sedimenttransport richting kribvak/uiteerwaard Stroomaanval in kribvak/uiteerwaard Stroomverlamming in hoofdgeul	Aanzanding in kribvak/uiteerwaard Instabiliteit oevers en constructies Bodemverandering in hoofdgeul	WAQUA toets tbv MHW-effect Steenstabiliteit kriblichaam handhaving vaarwegprofiel (na hoogwater)
Seizoensvariatie	wk	Verschuivende landwater overgang Veranderingen kribvakdimensies	Zie andere processen	
Lange termijn variatie	wk	Klimaatverandering (afvoeren en zeespiegel) Bodemverandering ("autonome" bodemdaling)	Verandering van afvoerdeling onderminning constructies, verandering kribvakbodem en oeverlijnen	Aanpassen afvoerregulering, funderingsdiepten, oeverbescherming, opstuwing bij MHW,...

Tabel 2.2. Beschrijving processen en bijbehorende effecten.

Ter vereenvoudiging worden processen per tijdschaal afzonderlijk geanalyseerd (processen met grote verschillen in tijdschaal worden van elkaar ontkoppeld). Dit betekent dat voor elk tijdschaalniveau de directe relatie tussen krib eigenschappen en bijbehorende morfologische effecten wordt bekeken. De interactie van morfologische effecten van ingrepen op verschillende schaalniveau's wordt verwaarloosd. Dit laatste is alleen toelaatbaar als de ingrepen relatief klein zijn (grootte-orde 5%) en als tijdschalen van de relevante processen uit Tabel 2.2 voldoende van elkaar verschillen.

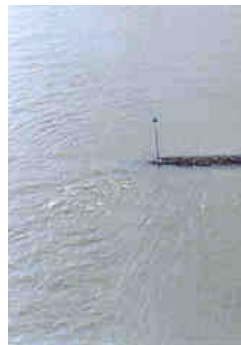


Fig. 2.3-a Turbulentie en wervels bij de kribkop, (Waal km 939, Meetkundige Dienst, 1995)



Fig. 2.3-b Achterloopsheid, (Erlecomse Waard, Waal km 873, Meetkundige Dienst, 1995)

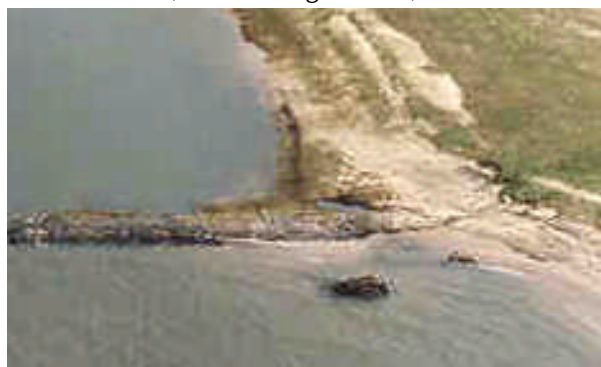


Fig. 2.3-c Initiële erosie bij kribwortel, detail van Fig. 2.1-c



Fig. 2.3-d Vrije stroming over de krib, geforceerd door scheepspassage (Waal km 901, Meetkundige Dienst, 1995)

Op basis van Tabel 2.2 worden voor een functioneel kribontwerp de processen in de volgende categorieën gebundeld.

categorie	schaalniveau			type effect
	maat	lengte	tijd	
grootschalig	riviertak	50 km	50 jaar	lange termijn bodemdaling Waal
lokaal	rivierbreedte	5 á 10 km	week tot 1 á 2 jaar	hoogwatereffecten
instantaan	waterdiepte	100 m	dag	ontgronding bij kribkoppen

Tabel 2.3 Relevante categorieën.

In deze studie staan de eerste twee categorieën centraal. Voor de grootschalige effecten kan met voldoende betrouwbaarheid gebruik worden gemaakt van bestaande rivierkundige kennis. De huidige ontwikkelingen worden geschetst in Hoofdstuk 3. Voor de lokale effecten, op rivierbreedte-niveau, wordt op basis van de huidige kennis een verkenning gemaakt voor een functioneel kribontwerp. Voor de zeer lokale, instantane effecten (derde categorie) worden in dit rapport geen functie-eisen afgeleid, maar wordt verwezen naar WL (1997).

2.5 Conclusies

De belangrijkste kribfuncties voor wat betreft het ruimtelijk ontwerp in deze studie zijn

- afvoer van water (geen opstuwing, zo mogelijk verlaging van maatgevende waterstanden)
- afvoer van sediment (inzet van kribvakken in sedimenthuishouding van de Waal)
- normalisatie van de hoofdgeul ten behoeve van de scheepvaart
- bescherming van oevers (en zo mogelijk versterking van de voor oevers potentiële waarden)

Voor een functioneel en ruimtelijk kribontwerp moet eerst worden bepaald op welk schaalniveau een kribontwerp kan leiden tot een verbetering van de rivierfuncties. Om dit duidelijker te formuleren wordt opnieuw gebruik gemaakt van de categorieën uit Tabel 2.3;

- grootschalig (rivierniveau met lange termijn effecten zoals de Waalbodemdeling)
- lokaal (rivierbreedte niveau met gemiddelde effecten en hoogwatereffecten)
- instantaan (waterdiepte met relatief snelle effecten zoals de ontgronding bij kribkoppen of achterloopsheid bij kribwortels).

Op basis hiervan kunnen twee extremen worden onderscheiden:

a) bottom-up benadering

Aanpassingen van het kribontwerp kunnen erop gericht zijn om instantane effecten (rondom de krib) te verbeteren, met een ongewijzigd functioneren op rivierbreedte en rivierniveau als uitgangspunt (bv. in WL (1997)).

b) top-down benadering

Een ander uiterste is daarentegen het verbeteren van kribfuncties op rivierniveau, zonder verandering van instantane en lokale kribprestaties (zoals bv in spankrachtstudies).

Veronderstel dat de instantane effecten (rondom de krib) en de grootschalige effecten afzonderlijk van elkaar kunnen worden geanalyseerd. In dat geval kan op beide niveau's een optimaal kribontwerp worden geformuleerd. Als ontwerpstrategie is het dan mogelijk om te streven naar een "rivierniveau" ruimtelijk kribontwerp, als uitgangspunt voor lokale optimalisatie. Dit rapport beperkt zich tot een functioneel kribontwerp voor

- grootschalige effecten met rivierniveau gemiddelde krib- en riviereigenschappen
- lokale effecten op een lengteschaal van 5 á 10 km, overeenkomend met een Waalbochtlengte of een rivierstuk langs een uiterwaard

Op basis hiervan worden de eisen geformuleerd waaraan de krib op het kleinschalige niveau van de instantane effecten moet voldoen. Deze eisen kunnen worden gebruikt om een innovatief kribontwerp zoals de palenrij te beoordelen (Sieben, 2002).

Er ligt op verschillende schaalniveau's (rivierniveau/rivierbreedte) ruimte voor aanpassing en optimalisering van het functioneel ontwerp van kribben. De kennis over het functioneren van een krib lijkt niet voor alle

aspecten compleet of ontsloten. Er wordt daarom ook getracht om de kennishiaten te inventariseren die een uitwerking van een functioneel ontwerp in een ruimtelijk ontwerp beperken.

Hoofdstuk 3 Inventarisatie huidige ontwikkelingen Waal

3.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 is beschreven dat in dit rapport een functioneel kribontwerp wordt geformuleerd op het *grootschalige* niveau van de riviertak en op het *lokale* niveau van de rivierbreedte. Het inventariseren van de huidige en historische ontwikkelingen van de Waal is nodig om de bijbehorende kribfuncties uit te werken

- afvoer van water (geen opstuwing, zo mogelijk verlaging van maatgevende waterstanden)
- afvoer van sediment (inzet van kribvakken in sedimenthuishouding van de Waal)
- normalisatie van de hoofdgeul ten behoeve van de scheepvaart
- bescherming van oevers (en zo mogelijk versterking van de voor oevers potentiële waarden)

Voor zover mogelijk, wordt in dit hoofdstuk een beknopt beeld geschetst van de relevante morfologische ontwikkelingen in hoofdgeul en oeverzone op

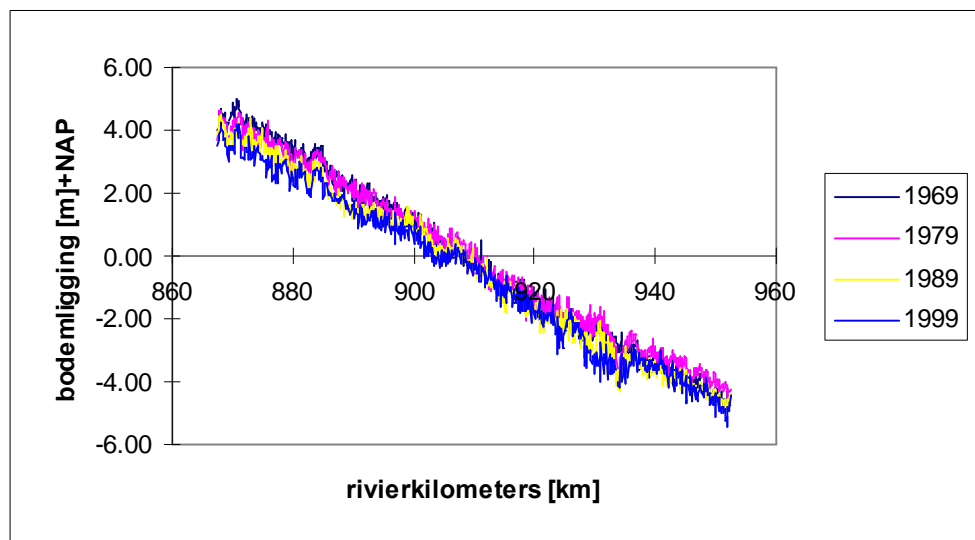
- i) rivierniveau voor de lange termijn (decennia)
- ii) op rivierbreedte-niveau voor een tijdschaal van dagen (hoogwater).

Er zijn in de Waal morfologische ontwikkelingen te onderscheiden als gevolg van i) ingrepen (voornamelijk normalisatie en baggeren) en ii) variërende stromingscondities (voornamelijk getijde-, hoogwater- en seizoenseffecten). Beide ontwikkelingen komen in dit hoofdstuk terug. De inventarisatie is ontleend aan Sieben (2001). Eerst wordt gekeken naar de ontwikkeling op rivierniveau, met voor een interpretatie hiervan grofweg de volgende onderwerpen;

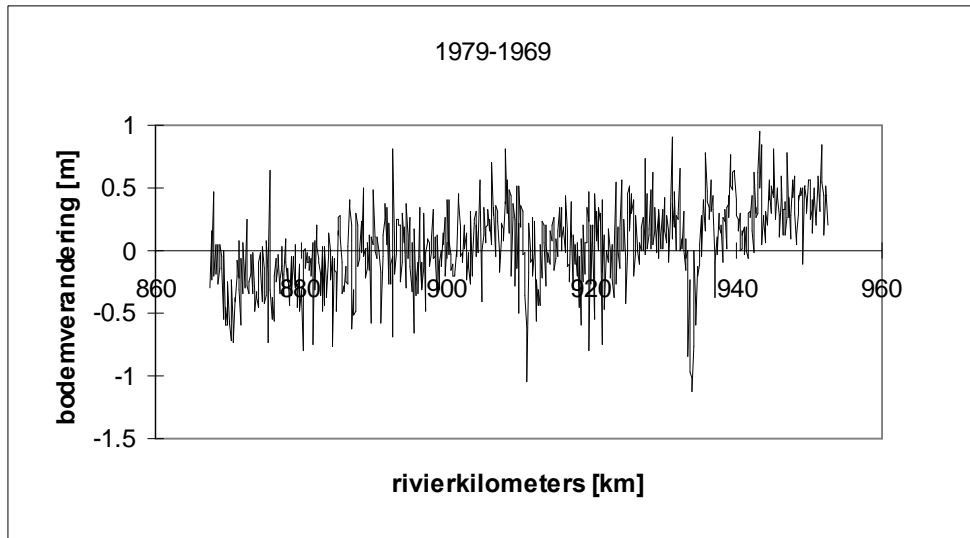
- i) veranderingen in het systeem (baggeren, aanpassingen normaalbreedte, aanbreng vaste lagen,...).
- ii) veranderingen in afvoer en bodemligging op de bovenstroomse rand (bij de Pannerdensche Kop)
- iii) waterstandsveranderingen op de benedenstroomse rand (getijde-invloed)

3.2 Grootschalige bodemveranderingen in het zomerbed

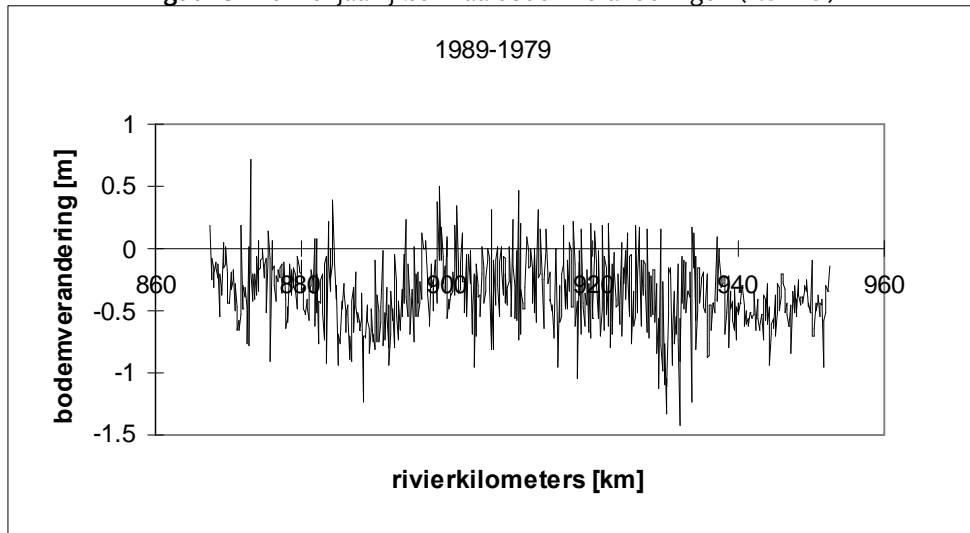
Zonder een complete analyse uit te voeren wordt een aantal relevante ontwikkelingen genoemd met een bijbehorende grootte-orde. Er wordt gebruik gemaakt van jaarlijkse bodempeilingen zoals bewerkt in Ten Brinke (2000). Van deze jaarlijkse bodempeilingen zijn in Fig.3.1 de ruimtelijk gemiddelde waarden voor het zomerbed tussen de normaallijnen weergegeven. De decade-gemiddelde bodemligging, en de bodemveranderingen per 10 jaar zijn dan zoals weergegeven in Fig.3.1.



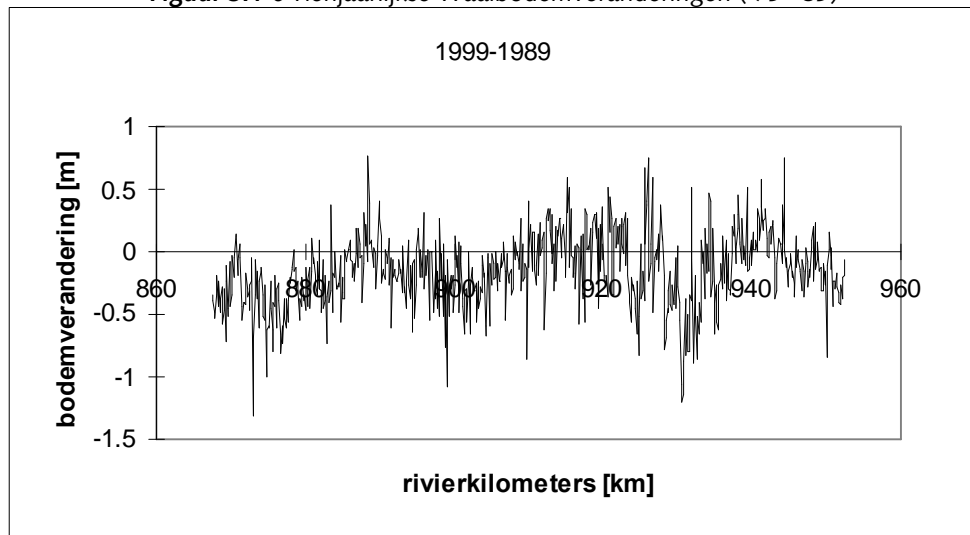
Figuur 3.1-a Langsprofiel Waalbodemliggingen



Figuur 3.1-b Tienjaarlijkse Waalbodempliggingen ('69-'79).



Figuur 3.1-c Tienjaarlijkse Waalbodempliggingen ('79-'89)

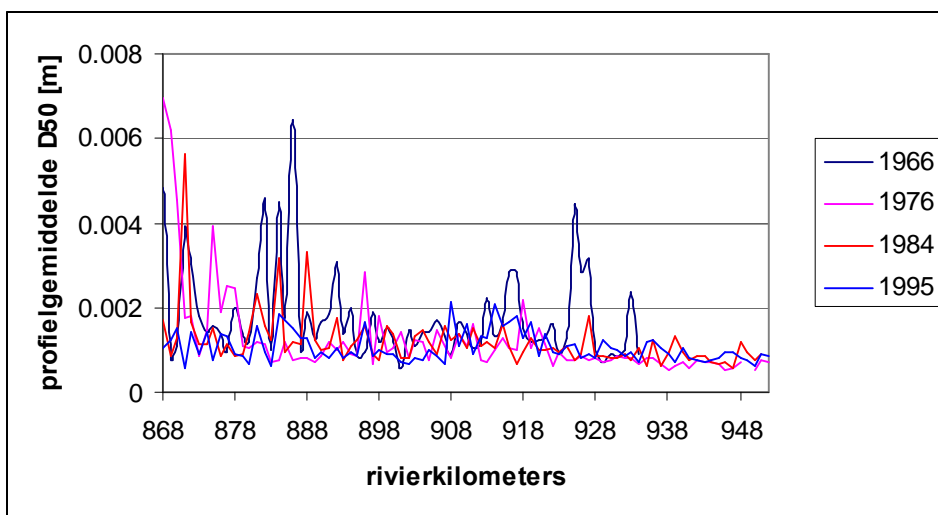


Figuur 3.1-d Tienjaarlijkse Waalbodempliggingen ('89-'99)

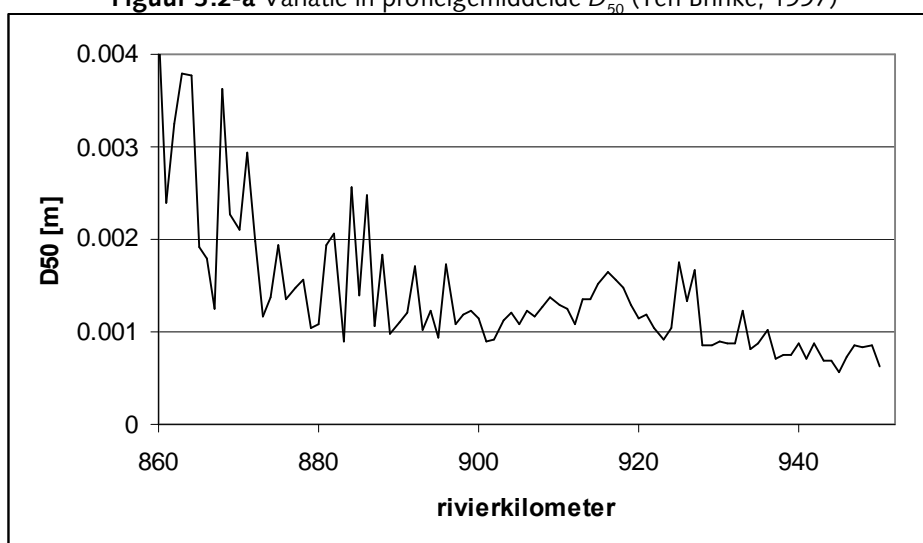
De in Fig.3.1 weergegeven bodempliggingen zijn ruimtelijk gemiddelde waarden voor waarnemingen van het zomerbed tussen de normaallijnen. De trend is een bodemdaling over de gehele lengte van de Waal. De meetdata vertonen in de km-gemiddelde bodempliggingen korte termijn variaties in de orde van 0,2 m.

Uit de veranderingen in bodemligging kan worden afgeleid dat de bodemdaling zich in benedenstroomse richting voortplant met een snelheid van ruim 1 km per jaar (zie bv. Sieben, 2001).

Tegelijkertijd met de algehele bodemdaling *lijkt* (de kwaliteit van de waarnemingen is onbekend) het korrelgrootteverloop in de Waal uniformer te zijn worden (Fig.3.2-a). Ter plekke van de Pannerdensche Kop en de bocht bij Nijmegen (Boven-Waal) lijkt de D_{50} te zijn afgenomen. De over alle waarnemingen gemiddelde, profielgemiddelde korreldiameter (Fig.2.3-b) is in de orde van 0,0020 m in de Bovenwaal, 0,0010 m in de MiddenWaal (met een lokaal grover rivierstuk in de bocht bij Tiel, ter hoogte van de Peel breuklijn) en 0,0007 m in de BenedenWaal. Veranderingen in korrelgrootte zijn afhankelijk van de korrelgrootte-samenstelling van het passerend sedimenttransport (en daarmee van de bodemsamenstelling van het bovenstroomse rivierstuk), en van de korrelgrootte-samenstelling van de ondergrond.



Figuur 3.2-a Variatie in profielgemiddelde D_{50} (Ten Brinke, 1997)



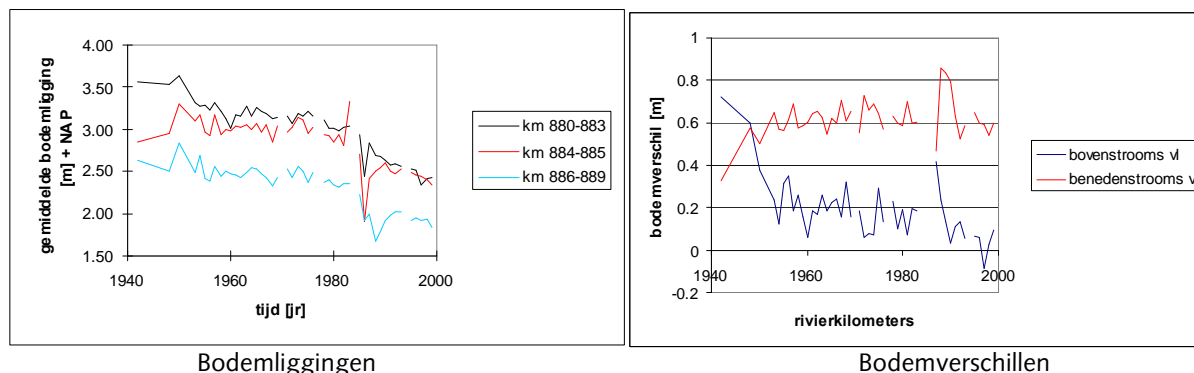
Figuur 3.2-b Gemiddelde profielgemiddelde D_{50} van alle waarnemingen.

3.3 Veranderingen in het systeem

Voordat wordt gekeken naar de invloed van de bovenstroomse en benedenstroomse randen, wordt het effect van de vaste laag bij Nijmegen en invloed van baggeren kort toegelicht. In Fig.3.3 is het 3 km-gemiddelde verloop in bodemligging direct boven- en benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen weergegeven. De gemiddelde bodemliggingen van km 880-883 en km 884-885 naderen elkaar (circa 0,03 á 0,04 m per 10 jaar); de vaste laag werkt stabiliserend voor de bodem bovenstrooms ervan. Als het sediment transport over en langs de vaste laag wordt onderdrukt dan kan benedenstrooms ervan de bodemdaling worden versneld. Echter het bodemverschil tussen het rivierstuk met de vaste laag en het rivierstuk

benedenstrooms ervan neemt slechts zeer langzaam toe (circa 0,005 á 0,010 m per 10 jaar, rechterfiguur Fig.3.3). Het lijkt dus waarschijnlijk dat

- bovenstroomse bodemveranderingen de vaste laag kunnen passeren (Struiksmá, 1985, 1999)
- de invloed van bodemveranderingen benedenstrooms van Nijmegen op de bodemligging bovenstrooms van Nijmegen door de vaste laag (gedeeltelijk) wordt gedempt.

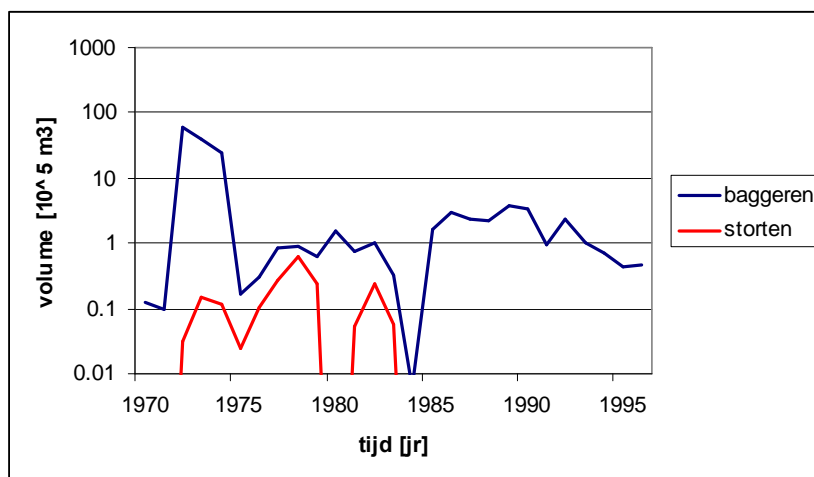


Figuur 3.3 Effect vaste laag bij Nijmegen

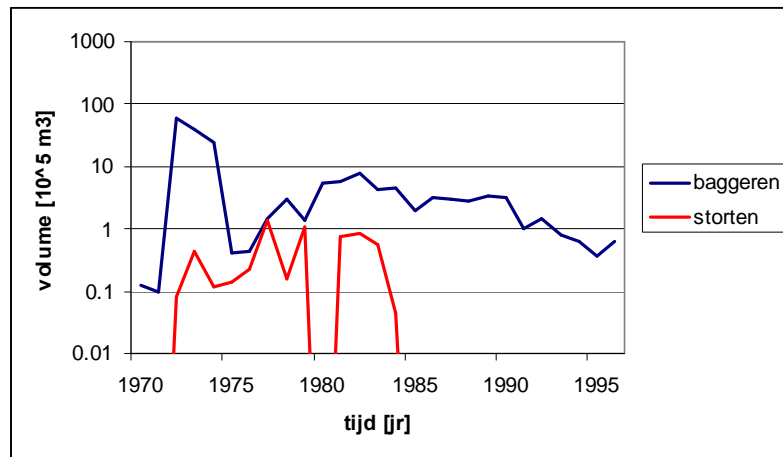
Bij extrapolatie van de ontwikkeling in Fig.3.3, verdeelt de vaste laag bij Nijmegen de Waal in twee rivierstukken;

- bovenstrooms (tussen Nijmegen en Pannerdensché Kop) met een kleinere bodemhelling en eventueel verminderde bodemdaling
- benedenstrooms van de vaste laag met een in kleine mate versnelde bodemdaling

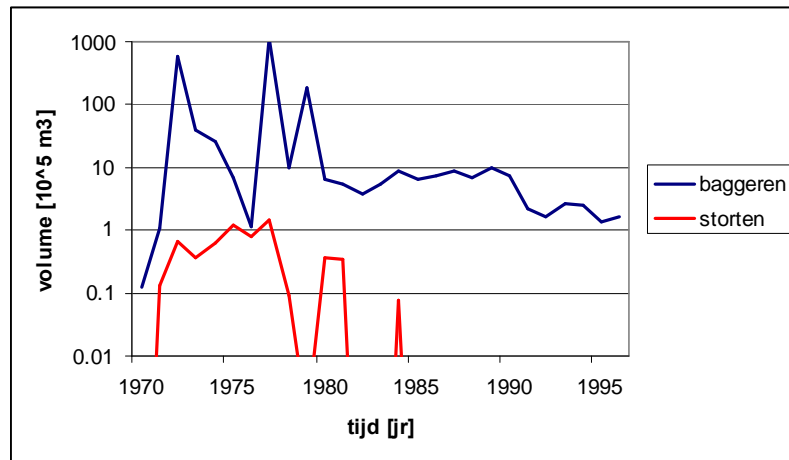
Uit de veranderingen in bodemlangsprofielen van Fig.3.1 lijkt een kanteling van de bodemhelling te ontstaan, waarbij de aanzanding in het benedenstroomse deel door baggeren lijkt te worden onderdrukt. Ter illustratie hiervan, in het verloop van het gebaggerde volume valt in benedenstroomse richting een toename met een factor 5 waar te nemen. Dit is weergegeven voor Fig.3.5-a, b en c, waarin voor verschillende rivierstukken het gebaggerd (en gestort) volume is weergegeven. Hieruit blijkt dat de grootste sedimentonttrekking plaatsvond in de BenedenWaal (vanwege onzekerheden in volumes en gerapporteerde lokaties gaat het om een kwalitatieve indruk).



Figuur 3.5-a Volumen onttrokken en gestort km 857-885 (Ten Brinke, 2001).

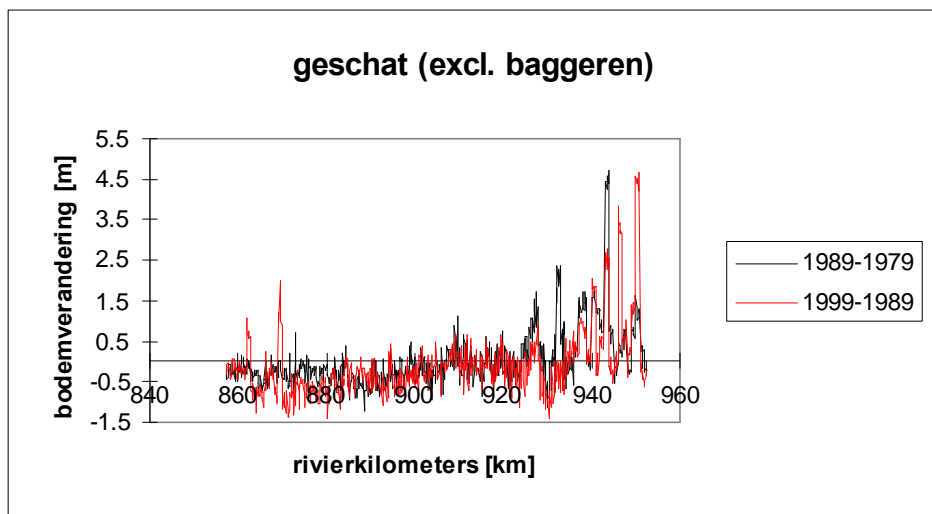


Figuur 3.5-b Volumes onttrokken en gestort km 886-910 (Ten Brinke, 2001).



Figuur 3.5-c Volumes onttrokken en gestort km 911-952 (Ten Brinke, 2001).

Het mogelijk effect hiervan wordt duidelijk uit Fig.3.5-d, in vergelijking tot Fig.3.1-c en 3.1-d. In Fig.3.1-c en 3.1-d is de *waargenomen* bodemverandering in een periode van 10 jaar weergegeven. De trend is een min of meer uniforme daling. Als nu, op basis van de gegevens in Ten Brinke (2000), de invloed van sedimentonttrekking door baggeren wordt geschat, en uit de waargenomen bodemverandering wordt geëlimineerd, dan wordt een indruk verkregen van de bodemveranderingen zonder baggeren.



Figuur 3.5 Geschatte bodemverandering exclusief baggeren.

Zoals in Fig.3.5-ds te zien zou zonder baggeren sprake zijn van een bovenstroomse daling en een benedenstroomse sedimentatie. De waarde van de absolute getallen zijn van minder belang dan de conclusie dat door middel van het baggeren, een aanzandingstrend vanaf km-raai 940 (en waarschijnlijk vanaf km-raai 920) wordt onderdrukt.

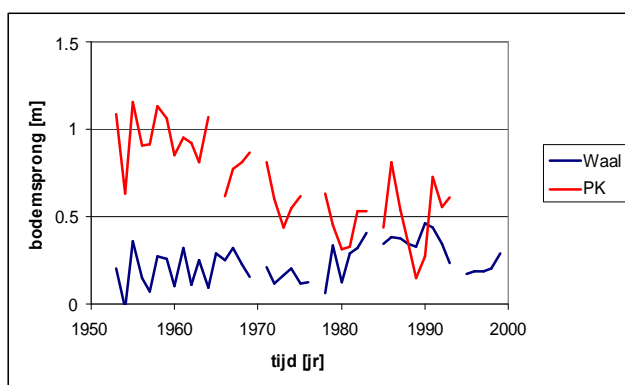
3.4 Invloed van de randen op het zomerbed

Er zijn aan de bovenstroomse rand twee factoren aan te wijzen voor bodemveranderingen in de Waal;

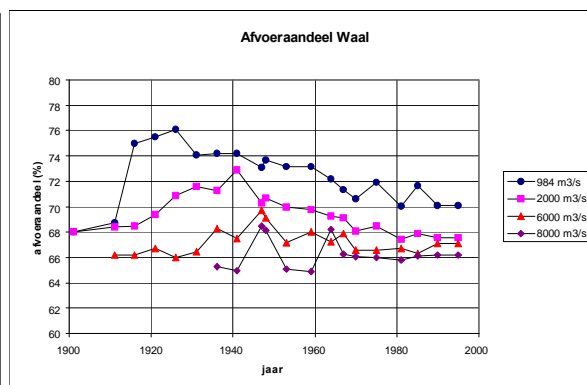
- veranderingen in bovenstroomse bodemligging (Duitse Rijntakken)
- veranderingen in afvoer- en sedimentverdeling bij het splitsingspunt van de Pannerdensch Kop

Voor het eerste moet worden gekeken naar de bodemveranderingen bovenstrooms van de Pannerdensch Kop (50 jaar voorspellen betekent in ieder geval bodemliggingen beschouwen van minstens 50 km stroomopwaarts...). Hier wordt volstaan met de opmerking dat in bovenstroomse rivierstukken (Duitse Rijntakken) ook in de komende jaren waarschijnlijk sprake zal zijn van voortgaande bodemdaling (Swanenberg *et al.* 1991).

Voor het tweede (veranderingen in afvoer- en sedimentverdeling) wordt gebruik gemaakt van een analyse in Schropp (2000). Hieruit blijkt een continue *afname* in Waalafvoer ten gunste van het Pannerdensch Kanaal; in de periode 1920 tot 2000 is dit in de orde van 5 á 10% afname in Waalafvoer bij een Bovenrijnafvoer van 2.000 m³/s (Fig.3.6-b). Als gevolg hiervan neemt bij de Pannerdensch Kop het *lokaal* verschil in bodemhoogte (bodemsprong) tussen Bovenrijn en Waal toe (Fig.3.6-a).



Figuur 3.6-a Verloop lokale bodemsprongen bij Pannerdensch Kop



Figuur 3.6-b Verloop afvoerdeling tussen Waal en Pannerdensch Kanaal (Schropp, 2000).

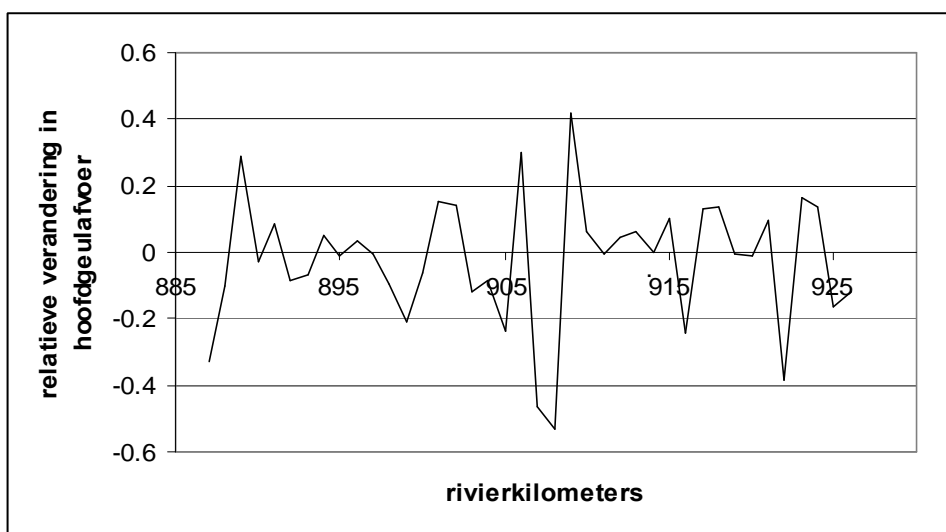
Een dergelijke afvoerandering leidt niet alleen tot een *groei* van de lokale bodemsprong in de Waal ter plekke van de Pannerdensch Kop (zie ook Asmerom, 2001), maar ook tot een aanpassing in Waal-bodemhelling van het langsprofiel. Een schatting hiervan is gemaakt in Bijlage D. Als de Waalafvoer met 10 % afneemt en het sedimentaanbod aan de Waal met 30%, dan betekent dit voor een nieuwe evenwichtssituatie een 10% afname in evenwichtsbodemhelling. Ter illustratie, als de bodemligging bij de Pannerdensch Kop 10 m hoger ligt dan de bodemligging in de mond, dan betekent 10% afname in bodemhelling een bodemdaling van ongeveer 1 m bij de Pannerdensch Kop. Deze grootte komt overeen met de gemeten ontwikkeling in Fig.3.1; veranderingen in afvoer- en sedimentverdeling tussen Waal en Pannerdensch Kanaal kunnen mogelijk dus een *deel* van de bodemdaling op de Waal verklaren.

Op de benedenstroomse rand speelt sinds de afsluiting van het Haringvliet (2 November 1970) een afname van het getijde op de rivier. Een tijverschil op een rivier leidt tot een versterking van de transportcapaciteit; een afname van het tijverschil leidt dan tot sedimentatie in het gebied met getijdeinvloed. In het decade vóór afsluiting van het Haringvliet is het gemiddelde tij-verschil bij Herwijnen (km-raai 943) ongeveer 0,83 m; bij meetstation Zaltbommel (km-raai 935) 0,38 m en bij meetstation Tiel (km-raai 915) 0,02 m. Ná afsluiting van het Haringvliet is bovenstrooms van Herwijnen, (dus bij de meetstation te Zaltbommel en Tiel) de invloed van getij op het sedimenttransport verdwenen. Benedenstrooms van Tiel kan er dus, waarschijnlijk door afsluiting van het Haringvliet, sprake zijn van sedimentatie door een afname in sedimenttransportcapaciteit. (Sieben, 2001).

Als het beheer van de Haringvlietsluizen weer leidt tot ongedempt getij ("beperkt beheer als stormvloed kering") of beperkt getij ("getempt getij") op de Waal, dan is op grond van het bovenstaande te verwachten dat tussen Moerdijk en Tiel de tijgemiddelde transportcapaciteit weer toeneemt.

3.5 Structurele hoogwatereffecten

Omdat kribben niet alleen reguleren in situaties met gemiddelde afvoer, moet worden onderzocht wat de invloed van kribben op de bodemveranderingen tijdens hoogwater is. Immers, een *lokaal* afwijkende kribhoogte kan tijdens hogere afvoeren de stroombanen *lokaal* corrigeren, met het doel een bodemverandering te veroorzaken die bijvoorbeeld kan leiden tot vaarwegverbetering of een verminderd risico op oevererosie. Een lokaal verschijnsel (met een lengteschaal van enkele malen de normaalbreedte), betreft de morfodynamica tijdens hoogwater. Dit zijn bodemveranderingen die worden opgewekt door de variërende afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed. In Fig.3.7 zijn de met WAQUA berekende relatieve veranderingen in hoofdgeulafvoer tijdens een hoogwater weergegeven.

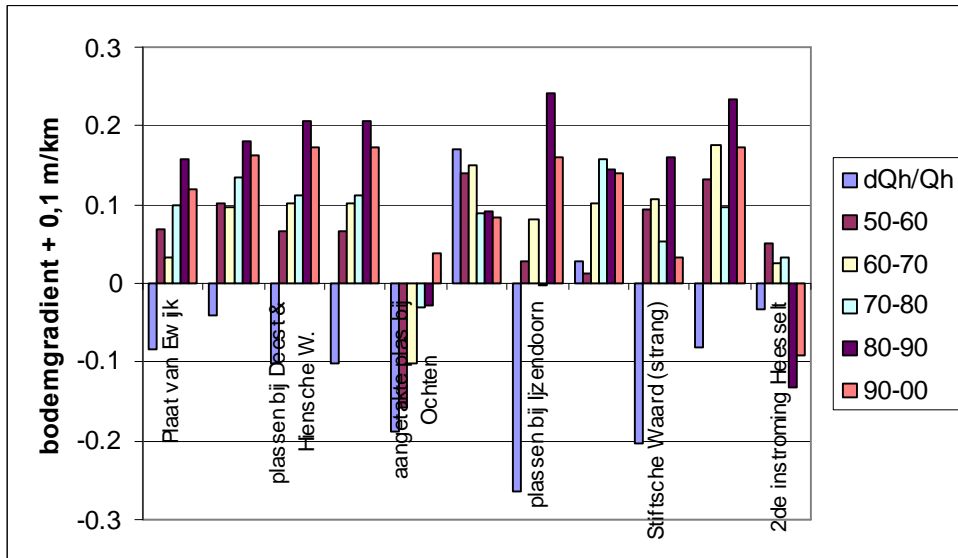


Figuur 3.7 Overzicht veranderingen in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater.

In Douben (1995) wordt een overzicht gegeven van trajecten op de Midden-Waal, waarop MGD's (minst gepeilde diepten) na afloop van een hoogwater worden waargenomen:

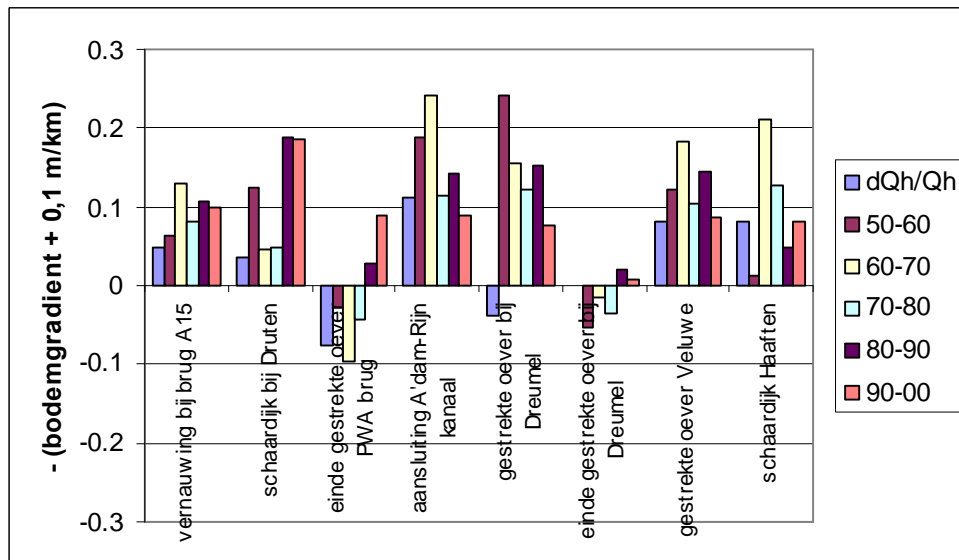
- Km-raai 886,000-887,000 (Weurt)
- Km-raai 891,700-894,200 (Ewijk)
- Km-raai 902,000-905,000 (Drueten)
- Km-raai 905,500-908,000 (Ochten)
- Km-raai 909,500-911,900 (Ijzendoorn)
- Km-raai 921,500-923,500 (Varik)

Op deze lokaties is veelal sprake van een afname in hoofdgeulafvoer (Fig.3.7) én een jaargemiddelde verondieping (Sieben, 2001). Dit is in Fig.3.8-a uitgezet, samen met de lokale verandering in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater (Fig.3.8-a 1^{ste} kolom behorend bij dQ_h/Q_h). Een afname in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater, correspondeert met een jaargemiddelde verondieping. De grootte van het lokale bodemhoogteverschil is gecorrigeerd voor een gemiddeld bodemverhang van 0,1 m per km.



Figuur 3.8-a Overzicht lokaties met structurele verondieping

Op een analoge manier leidt een lokale *toename* in hoofdgeulafvoer tot een lokale *verdieping* van de hoofdgeul. Ook ter plekke van schaar dijken, stroombelemmerende hoogwatervrije terreinen of zomerkaden en stroomconcentrerende aansluitingen tussen plassen en hoofdgeul is vaak een structurele, jaargemiddelde verdieping te vinden (Sieben, 2001). Dit is weergegeven in Fig.3.8-b.



Figuur 3.8-b Overzicht lokaties met structurele verdieping.

De grootte van de lokale verdieping/verondieping in Fig.3.8-a en 3.8-b betreft een km-gemiddelde waarde voor het gehele dwarsprofiel. Volgens WL (1997) kan de lokale grootte hiervan een factor 2 á 3 afwijken. De grootte-orde van de jaargemiddelde, lokale bodemstructuren wordt daarom geschat op 0,2 á 0,5 m. De grootte direct na een hoogwater kan hiervan afwijken.

3.6 Lange termijn ontwikkelingen van de oeverlijn

Om een indruk te krijgen van de stabiliteit van oeverlijnen langs de Waal, zijn waarnemingen van Kornman (1993) in de volgende figuren samengevat. Kornman (1993) deelt de waarnemingen in drie perioden in ; 1967-1975; 1976-1984; 1985-1991, waarvan in de twee laatste perioden de meeste hoogwaters optraden (Van Vuuren, 2000) . De veranderingen in de oeverlijn zijn bepaald door analyse van luchtfoto's en betreft

in feite de *verandering in vegetatiegrens* ten opzichte van de normaallijn. Kornman (1993) concludeert dat in zijn waarnemingen geen correlatie is te vinden tussen verplaatsingen van de oeverlijn en

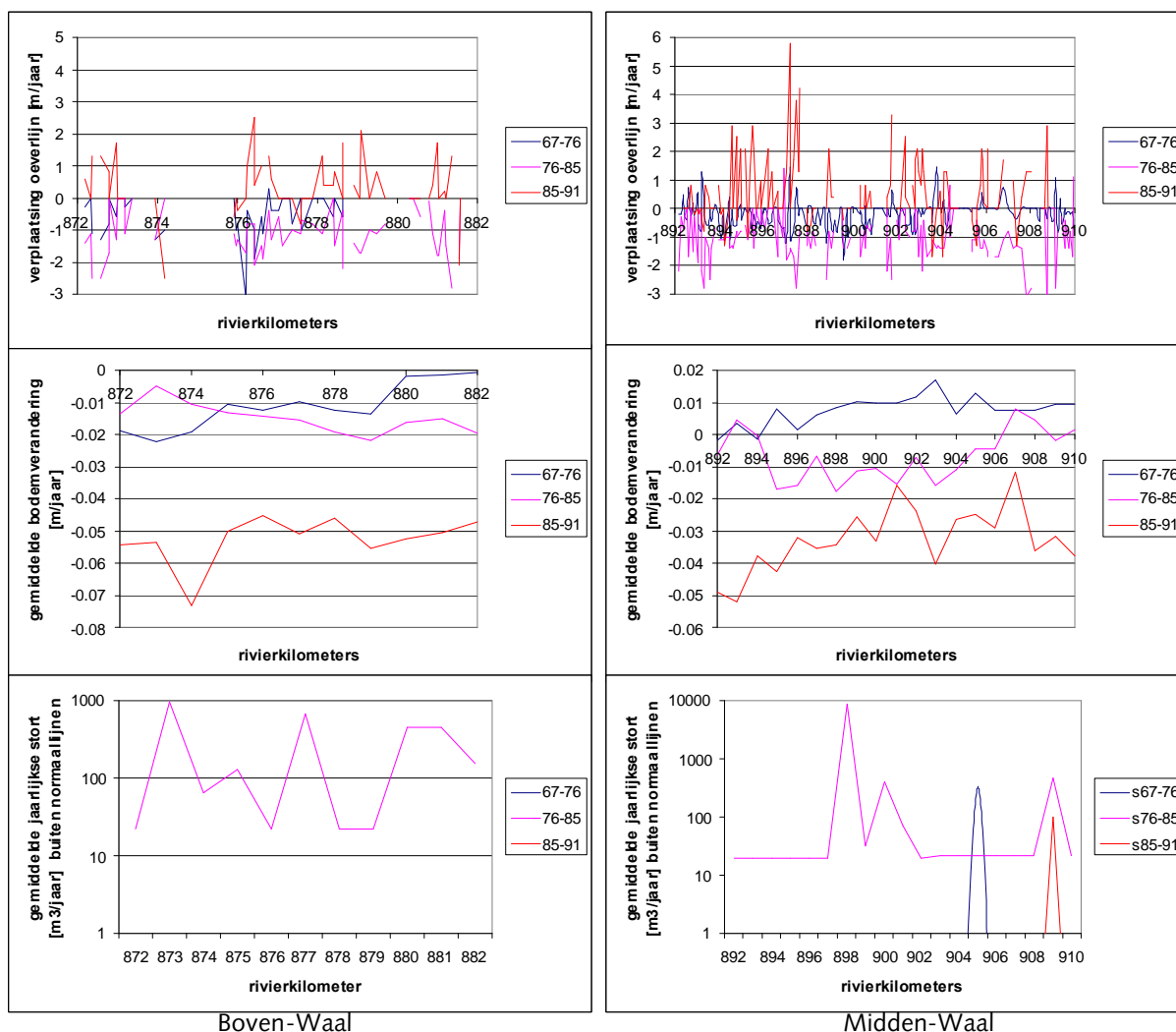
- de lokatie van de oever (binnen- vs buitenbocht)
- de linker- of rechteroever
- de hoogte van de oeverlijn in relatie tot de bijbehorende waterstandoverschrijdingskans
- de bodemveranderingen in de hoofdgeul

Voor beide rivierstukken (Boven-Waal en Midden-Waal) is in de volgende figuren de oeverlijnverplaatsing (Kornman, 1993), de gemiddelde bodemdaling (Ten Brinke, 2000) en het gemiddelde stortvolume buiten de normaallijn (Ten Brinke, 2000) weergegeven. Uit Fig.3.9 blijkt dat in de periode 1976-1985 sprake was van een bodemdaling (grootte orde 0,01 m/jaar), een *terugschrijdende* oeverlijn (grootte-orde 1 m/jaar), en volgens de data van Ten Brinke (2000) een aanzienlijk stortvolume buiten de normaallijnen. In de (kortere) periode van 1985-1991 was er sprake van een versnelde bodemdaling (in de orde van 0,03 á 0,05 m/jaar), een klein stortvolume buiten de normaallijnen en *voortschrijdende* oeverlijn (grootte-orde 0,5 m/jaar). Ter indicatie; op basis van historische rivierkaarten schat Wolfert (2001) dat buitenbochten in de MiddenWaal van de 19^{de} eeuw jaarlijks over een afstand van 0,54% van de rivierbreedte verplaatsten. Deze historische waarde is een factor 3 groter dan de huidige 0,5 m/jaar (circa 0,19 %).

Op basis van waargenomen verandering in oeverlijn migratie, wordt hier gesteld dat

- de oeverlijnen op de lange termijn terugschrijden met een dalende Waalbodem (met een verhouding van ongeveer 1:10)
- de migratie van oeverlijnen beïnvloedt wordt door het storten buiten normaallijnen

Als sprake is van een snelle aanpassing van het kribvakbodempfiel aan de langzame grootschalige bodemdaling van de Waal, dan zou de genoemde verhouding van 1:10 als een representatieve bodemdwarshelling van de oevers kunnen worden opgevat.



Figuur 3.9 Veranderingen in oeverlijn en bodem, en jaarlijkse stort

Net als bij de inventarisatie van morfologische ontwikkelingen in het zomerbed, kan ook voor wat betreft de oevermorfodynamica een onderscheid gemaakt worden in riviertak- en rivierbreedteniveau. Voor processen op rivierbreedte-niveau kan worden verwezen naar Sorber (1997). Hierin wordt de oever sedimentatie geanalyseerd na de hoogwaters van 1993/1994 en 1995. De belangrijkste conclusies zijn dat deze sedimentatie optreedt

- op lokaties met sedimentrijke stroombanen richting uiterwaard (met name in binnenbochten)
- in een zone van 50 a 100 m langs de hoofdgeul

Waarnemingen van oevererosie tijdens een hoogwater zijn minder bekend. Een overzicht van theoretische concepten kan worden gevonden in WL Delft Hydraulics (1999). De ervaring bij dienstkringen leert dat in de achterloopsheid van kribben, die tijdens een periode van hogere afvoeren zeer snel kan ontwikkelen (orde 1 tot 10 m oeverafslag per hoogwater), nog geen eenduidige relatie is ontdekt tussen erosie bij de kribwortel en het lokale stromingbeeld tijdens hoogwater. Bij de monitoring van de periodiek-stromende geulen bij Gameren bleek in de *beginperiode* een geuloever door scheepvaartgolven circa 5 m per jaar te eroderen, terwijl halverwege de geul de gemiddelde oevererosie ongeveer 0,4 m per jaar bedroeg (Schropp *et al.* 1999).

3.7 Huidige afvoerregulering

Bij het vastleggen van geulen (regulering/normalisering) kunnen doorgaande of puntopleggingen worden toegepast (of een combinatie hiervan d.m.v. een bolwerk). De keuze hiertussen wordt veelal door de kosten van aanleg en onderhoud bepaald, en hangt af van de lokale situatie. Traditioneel lijkt de afstand tussen normaallijn en oever richtinggevend in de keuze (Tabel 3.1), maar ook ander aspecten, zoals bv. de lengteschaal in langsrichting (uniformiteit in oeverbelijning of opstuwing bij maatgevende afvoer) kunnen in de afweging van belang zijn.

afstand tussen normaallijn en oever (kwalitatief)	type reguleringswerk
zeer klein	oeverbescherming
Klein	geleidewerk
Groter	strekdammen
nog groter	kribben

Tabel 3.1 Kwalitatieve indeling van reguleringswerken (Bouwmeester, 1989).

Langs de Waal zijn afwisselend bekribte oevers en gestrekte belijningen te vinden. De gestrekte belijningen zijn langs de Waal voornamelijk te vinden

- i) op plekken waar voorheen sprake was van ernstige oeverafslag (binnenbocht Hulhuizen)
- ii) langs oevers met beperkte ruimte voor verdediging (nabije kade, hoogwatervrij terrein, schaaardijk,...)
- iii) ter plekke van brugpijlers (Prins Willem-Alexander brug), binnenhavens (Druten), overslagkaden
- iv) ter plekke van uiterwaardplassen (Ijzendoorn)

Ter aanvulling van Tabel 3.1 kan de motivatie van Lely (1890) worden genoemd voor toepassing van kribben op de bovenrivieren

- de kribvakken bieden sedimentatiemogelijkheden (tijdens en na de normalisatie werd erosie van de hoofdgeul verwacht)
- de kribben zijn goedkoper aanleg en onderhoud dan strekdammen (bij een krib concentreert de aanval zich alleen bij de kop)
- de normaalbreedte kan bij kribben gemakkelijker worden aangepast

Bij voorbeeld in geval van een buitenbocht, of in geval van een grote afstand tussen de oeverlijn en de normaallijn (conform Tabel 3.1), noemt Lely (1890) de mogelijkheid om lokaal strekdammen toe te passen.

Opgemerkt wordt dat in de decade-gemiddelde jaarlijkse dwarspeilingen een verband lijkt te bestaan tussen het type belijning en de lokale waterdiepte. Ter plekke van overgangen van kribben naar een gestrekte oeverbelijning is in het algemeen sprake van een structurele *verdieping*, terwijl bij een overgang van een gestrekte oeverbelijning naar een oever met kribben vaak sprake lijkt te zijn van een *verondieping*. Dit duidt

erop dat een doorgaande oplegging met een gestrekte oeverbelijning, zoals kan worden verwacht, de stroming beter reguleert dan een puntoplegging bij een oever met kribben.

km-raai	grootte-orde	toelichting
869	0,5 á 1,0 m verdieping	begin gestrekte oever Millinger dam
882	0,2 m verdieping	begin gestrekte oever / aansluiting Het Meer in Nijmegen-Oost
883	0,3 m verondieping	einde gestrekte oever
912	0,1 m verondieping	einde gestrekte oever Prins Willem Alexander brug
919	0,2 m verdieping	begin gestrekte oever bij Dreumel
920	0,1 m verondieping	einde gestrekte oever / stroming naar Stiftsche Waard
921	0,1 m verdieping	begin gestrekte oever
922	0,2 m verondieping	Stiftsche Waard (ter hoogte van strang) korte kribben

Tabel 3.2 Lokale bodemgradiënten en hypothetische verklaring met belijning (Sieben, 2001).

De bodemgradiënten zijn bepaald op basis van decade-gemiddelde bodemliggingen per km-raai, uit de grote data set van jaarlijkse dwarspeilingen. Voor een aantal lokaties kunnen, behalve de overgang in belijning, ook andere oorzaken genoemd worden. Voor wat betreft de rol van de sedimenthuishouding van kribvakken, en de relatie met hoofdgeul en uiterwaard is op dit moment nog weinig kennis in kwantitatieve relaties beschikbaar (Ten Brinke, 2002).

3.8 Beheer en onderhoud

Voor het huidige beheer van kribben voert de Dienstkring Bovenrijn en Waal per drie jaar een intensieve inspectie uit van alle kribben langs de Waal (Verhoeven, 2001). Met een ploeg van vier mensen en een boot vergt deze inspectie ongeveer drie á vier maanden. De inspectie richt zich met name op de conditie van het zet- en stortwerk (visuele controle), de helling en hoogte van de kribkop (bemeten en beoordeeld) en de aansluiting tussen krib en oever (visuele controle). De meest frequente faalmechanismen die worden waargenomen zijn achterloopsheid, vervorming van de kribkop ten gevolge van lokale ontgronding (kribkopversteiling), afschuiving en verzakking van de kruin (WL, 1997). Volgens Verhoeven (2001) is er met name de laatste jaren sprake van een toenemend aantal achterloopse kribben. Een tweede faalmechanisme is een instabiele kribkop ten gevolge van lokale ontgronding.



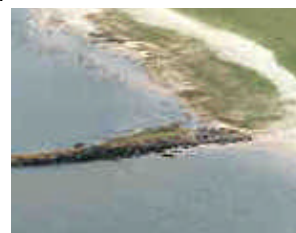
Figuur 3.10-a Herstel van achterloopse krib (Druuten, Waal km 907, Meetkundige Dienst 1995).



Figuur 3.10-b Herstel van achterloopse krib (Hurwenensche Waard, Waal km 928, Meetkundige Dienst 1995).

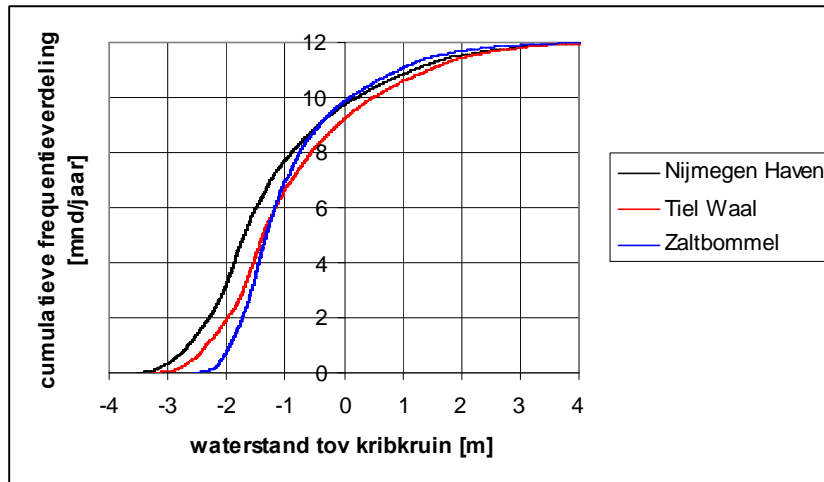


Figuur 3.10-c Herstel van achterloopse krib (Millingerwaard, Waal km 871, Meetkundige Dienst 1995).



Figuur 3.10-b Herstel van achterloopse krib (detail, Fig.2.1-c), Breemwaard, Waal km 934, Meetkundige Dienst, 1995).

Deze intensieve inspectie is slechts mogelijk als de waterstand minimaal 1,0 á 1,5 m onder de kribkruin blijft. Om een indruk te geven van de onderschrijdingsperiode, is in Fig.3.11 voor drie lokaties langs de Waal, de overschrijdingsfrequentie van de waterstand ten opzichte van de kribkruin uitgezet. Hieruit blijkt dat de kribkruinen gemiddeld ongeveer 10 maanden per jaar niet worden overstroomd. Gedurende gemiddeld 4 á 6 maanden per jaar is de waterstand minstens 1,5 m onder de kruin. Voor de huidige kribben is er dus sprake van een efficiënte inspectie, met een uitvoering die goed lijkt te zijn afgestemd op de waterstandstatistiek.



Figuur 3.11 Waterstanden t.o.v. de kribkruinhoogte.

Fig.3.10 laat eveneens zien dat voor een toepassing van lagere kribkruinen, de inspectie anders uitgevoerd moet worden. Dit is uitgewerkt in Tabel 3.3 en 3.4. Met een veronderstelde bouwtijd van 1 mnd is het zetten van kribben bij verlagingen van meer dan 1,5 m niet mogelijk (Fig.3.12).

Kruinverlaging [m]	onderschrijding [mnd] Boven-Waal	onderschrijding [mnd] Midden-Waal	onderschrijding [mnd] Benedenwaal
0,0	10	9	10
1,0	8	7	7
1,5	6	4	4
2,0	3	2	1

Tabel 3.3 Periode van droge kribkruin, als functie van kruinhoogte.

Duur van de inspectie [mnd]	verlaging [m] Boven-Waal	verlaging [m] Midden-Waal	verlaging [m] Benedenwaal
1,0	1,16	0,86	0,45
1,5	0,97	0,64	0,34
2,0	0,81	0,48	0,24

Tabel 3.4 Maximale kruinverlaging, bij een inspectie-eis van waterstanden minstens 1,5 m onder de kribkruin.

De opties voor een andere (kortere) inspectie zijn: i) efficiënter inspecteren; ii) sneller inspecteren en iii) veranderingen in kribconstructie

Ad i) efficiënter inspectie

Onderzocht zou kunnen worden of de belangrijkste (meest frequente) faalmechanismen via een "quick scan" methode kunnen worden opgespoord. Als dit met voldoende betrouwbaarheid mogelijk is, kunnen de goede kribben uit de inspectieronde te velde worden gefilterd. Als opties zijn genoemd:

- het opsporen van kribkopvervormingen uit multibeampeilingen
- het signaleren/volgen van achterloopsheid uit luchtfoto's na een hoogwaterperiode

Hier wordt opgemerkt dat voor een dergelijke snelle, maar indirecte waarneming van de kribconditie een duidelijke theoretische basis nodig is die op dit moment nog niet ontwikkeld lijkt te zijn.

Ad ii) sneller inspecteren

Naast het besteden van meer mandagen (meerdere inspectieploegen) is het een optie om in plaats van één keer per drie jaar alle kribben, jaarlijks een derde van de kribben te inspecteren. Dit bekort de periode van inspectie tot 1 á 1½ maand. In Tabel 3.4 is te zien bij welke kruinverlaging dit kan worden toegepast.

Ad iii) veranderingen in kribconstructie

Bij deze optie kan niet alleen de duur van inspectie veranderen, maar tevens de periode van aanleg en onderhoud. In principe zijn er twee opties denkbaar;

- *wijziging van de bestaande kribconstructie*. Een voorbeeld hiervan is het verwijderen van het zetwerk van de kribkruin. Dit levert niet alleen een verlaging (orde 1 m), maar de gewijzigde (stortstenen) krib vergt waarschijnlijk ook aanzienlijk minder onderhoud, wat gemiddeld kan plaatsvinden in een groter aantal werkbare dagen (Verhoeven, 2001).
- *toepassing van een andere constructie*. Een andere kribconstructie, zoals palenrijen, kan minder strenge eisen stellen aan de periode van aanleg en onderhoud dan de huidige kribconstructies.

Als deze andere constructie eveneens zo laag mogelijk wordt aangelegd, kan het ook bij deze optie nodig blijken om over te gaan naar een meer indirekter inspectie (ad i). De invloed van aanleg, beheer en onderhoud op het ruimtelijk ontwerp van een krib is in Tabel 3.5 samengevat. Verlaging van de kribben levert grofweg de volgende opties.

Optie	kruinverlaging [m] Boven-Waal	kruinverlaging [m] Midden-Waal	kruinverlaging [m] Beneden-Waal
snellere, <i>directe</i> inspectie ^{a)} & <i>huidige</i> kribconstructie	0,81	0,48	0,24
snellere, <i>directe</i> inspectie ^{b)} & <i>gewijzigde</i> kribconstructie	1,66	1,36	0,95
snellere, <i>indirectie</i> inspectie & <i>andere</i> constructie ^{c)}	2,83	2,52	1,99

Tabel 3.5 Overzicht mogelijkheden kruinverlaging .

^{a)} met minstens 1,5 m zicht onder de kruin

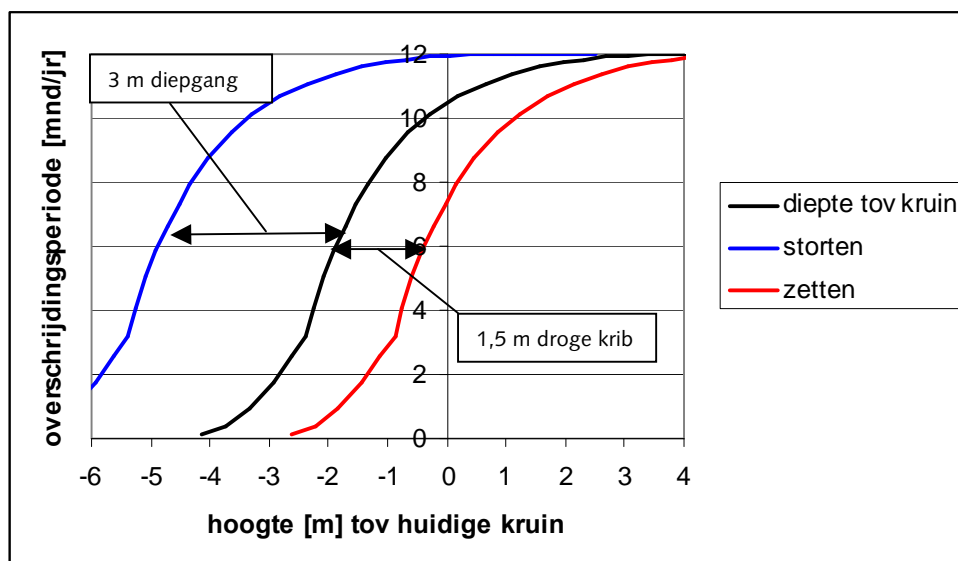
^{b)} met minstens 1,0 m zicht onder de kruin (verwijderen zetsteen op de kruin)

^{c)} aanleg op OLR niveau

Ter indicatie; in RvR (1999) wordt voorgesteld om de kribkruin maximaal met 2 m te verlagen tot een niveau behorend bij 4 m waterdiepte in de hoofdgeul (bijna 1½ maand per jaar onderschreden op de Boven-Waal).

De potentiële kribverlaging is natuurlijk niet alleen afhankelijk van de duur van aanleg, inspectie en onderhoud, maar uitvoerings- en onderhoudseisen zijn desondanks van belang voor het afbakenen van de kribdimensies. Volgens WL (1997) is storten aanvaardbaar voor stroomsnelheden bij de kop van minder dan 1 m/s, en bij minstens 3 m diepgang. Het zetten is daarentegen slechts mogelijk op een niveau van minstens 1 m boven de waterstand.

Met de bouwtijd per krib kan met deze afbakening in Fig.3.12 het volgende onderscheid gemaakt (het snelheidscriterium is niet meegenomen). Voor het storten is de blauwe lijn representatief. Met deze lijn wordt gevonden dat op de huidige kribben gemiddeld ½ maand per jaar meer dan 3 m water staat.



Figuur 3.12 Relatie bouwtijd en kruinhoogte.

Voor stortkribben tot 1 m onder de huidige kruin is slechts minder dan 1 mnd voldoende diepgang. Voor stortkribben tot 2 m onder de huidige kruin is 1½ mnd beschikbaar, terwijl voor 3 m lagere stortkribben drie maanden beschikbaar is. Dus, als het storten van een krib 1 mnd vergt, dan kan dit tot minstens 1,5 m onder de huidige kruin. Voor het zetten is de rode lijn representatief. Deze lijn duidt erop dat gedurende 6 mnd, de huidige kribben meer dan 1,5 m droog staan. Voor 1 m lagere kribben is deze periode 2 mnd. Voor 2 m lagere kribben is deze periode ongeveer een halve maand. Dus, als voor het zetten van een krib 1 mnd nodig is, dan kan dit tot maximaal 1,5 m onder de huidige kruin.

3.9 Conclusies

De beknopte inventarisatie leidt tot het volgende:

riviertakniveau

- Veranderingen op de boven- en benedenstroomse rand van de Waal (bodemdaling in Bovenrijn, verandering afvoer- en sedimentverdeling bij Pannerdensche Kop, demping tijverschillen benedenstrooms van Tiel) verklaren (een deel van) de bodemdaling in het bovenstroomse deel en de bodemstijging in het benedenstroomse deel.
- De invloed van baggeren op de bodemligging van met name het benedenstroomse deel van de Waal is groot.
- Vaste lagen beïnvloeden het morfologisch gedrag van de Waal; verwacht wordt een (gedeeltelijke) stabilisatie bovenstrooms van een vaste laag, en een mogelijk versnelde bodemdaling benedenstrooms ervan.
- De geschatte grootte van de "randeffecten" en het effect van baggeren wekken de indruk dat de invloed van normalisatiewerken (fixatie hoofdgeulbreedte in het begin van de 20^{ste} eeuw) langs de Waal voor de interpretatie van bodemveranderingen in de tweede helft van de 20^{ste} eeuw van minder belang is.
- De oeverlijnen schuiven op de lange termijn terug met een dalende Waalbodem (met een factor 10 in grootteverschil tussen oeverlijn migratie en bodemdaling)
- De migratie van oeverlijnen lijkt sterk te worden beïnvloed door het storten buiten normaallijnen.
- Als sprake is van lagere kribben, neemt de behoefte aan een snellere inspectie, en hiermee een grotere inzicht in de oorzaak en (functionele) gevolgen van faalmechanismen toe.

rivierbreedte niveau

- Een lokale afname in hoofdgeulafvoer tijdens hoogwater leidt tot een lokale structurele verondieping in het zomerbed. Een lokale toename in hoofdgeulafvoer leidt tot een structurele verdieping. Voor een aantal lokaties van de Waal leidt de verondieping na hoogwater tot overlast voor de scheepvaart.
- Op lokaties met sedimentrijke stroombanen richting uiterwaard (met name in binnenbochten) vindt tijdens hoogwater sedimentatie plaats in een zone van 50 á 100 m langs de hoofdgeul (inclusief de kribvakken)
- Bij de overgang van een bekripte oever naar een oever met een gestrekte belijning is sprake van een lokale verdieping. Bij een overgang van een gestrekte belijning naar een oever met kribben is sprake van een lokale verondieping. De gemiddelde waarde van beide overgangen is in de orde van 0,2 m.
- Het optreden van oevererosie is moeilijk te voorspellen, door een grote ruimtelijke variabiliteit in
 - lokale aanval (met onvoorspelbare factoren als incidentele begroeiing, kaalslag door vee of vandalisme,...)
 - lokale stabiliteit (zowel drempelwaarden als “reststerkten”)

Hoofdstuk 4 Inventarisatie huidige kribparameters

“Bij het normaliseeren met kribben treden drie vragen op den voorgrond, namelijk op welken afstand moeten de kribben worden gelegd, welke richting en welke hoogte dienen die te verkrijgen.” (Lely 1890).

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden eerst de belangrijkste kribparameters beschreven met een kwalitatieve toelichting van de relatie tussen kribparameter en kribfuncties. Dit leidt niet alleen tot een selectie en orde-grootte van relevante kribparameters, maar ook tot een aanduiding van relevante kennishiaten. Voor de vertaling van de functie-eisen uit het vorige hoofdstuk naar dimensies van een kribontwerp worden de volgende kribparameters gebruikt (Bouwmeester, 1989 en Ariens *et al* (1994);

Dimensies:	- lengte van de krib
	- hoogte van de krib (zowel t.o.v. de waterstanden als t.o.v. de kribvak- en uiterwaardbodempligging)
	- breedte van de krib
lokatie	- onderlinge afstand van de kribben
	- lokatie van de krib t.o.v. de tegenoverliggende krib
	- afstand van de krib t.o.v. de tegenoverliggende krib
	- hoek van de krib met de stroming en/of de oever
vorm	- kribkop (helling, layout,...)
	- bovenstroomse zijde van het kriblichaam (helling)
	- benedenstroomse zijde van het kriblichaam (helling)
	- kribkruin; langshelling, breedte
eigenschappen	- ruwheid van de krib
	- doorlatendheid van de krib
	- positie van het baken

Voor wat betreft een functioneel ontwerp op het *grootschalige* rivierniveau is met name van belang

- de normaalbreedte (afstand tussen de kribkoppen)
- de grootte en duur van de afvoer over de kribben ofwel de;
 - kriblengte t.o.v. de rivierbreedte
 - kruinhoogte t.o.v. de kribvakbodem
 - gecombineerde ruwheid van overstroomde krib en kribvak
 - overstromingsfrequentie van de kribkruinen
 - doorlatendheid van de constructie
- de opgelegde kromming van de hoofdgeul ter beperking van bochtovergangen en ter onderdrukking van wandelende zandbanken (“alternating bars”)

Met deze parameters kan een “riviernak-gemiddeld” ruimtelijk ontwerp worden gemaakt. Voor een functioneel ontwerp op rivierbreedte niveau is vooral de *variatie* ten opzichte van dit riviernakgemiddelde van belang voor een lokale optimalisatie.

De lokatie van kribkoppen is vastgelegd door normaallijnen, die zijn getrokken met als doel een normaal-breedte te verkrijgen die zo mogelijk constant is in een riviernak waar afvoer en sedimenttransportcapaciteit constant zijn (zonder grote krommingen en te lange bochtovergangen). Bij een toenemende getijde-invoed kan de normaalbreedte ter compensatie ook toenemen. Ervaringen met numerieke modellen voor tweedimensionale riviermorfologie duiden er (al of niet terecht) op dat lokale afwijkingen in de normaallijn leiden tot een relatief grote lokale bodemafwijking (een *kleinschalige* breedtevariatie van x % leidt bij benadering lokaal tot x% breedtegemiddelde dieptevariatie). Omdat met veranderingen (verschuivingen) in de vaargeul scheepvaartbelangen zijn gemoeid (nautische veiligheid), wordt de normaallijn als variabele in het functioneel kribontwerp zoveel mogelijk buiten beschouwing gelaten.

Het worteleinde van de krib is bepaald door de huidige of toekomstige oeverlijn en het tracé hiertussen bepaalt de kriblengte. De vorm van het kriblichaam (het boven- en benedenstrooms talud) is afhankelijk van uitvoeringseisen (zetsteen/stortsteen) en beïnvloedt de grootte van de ruwheid. Voor de rivierkundige effecten van een doorlatende krib wordt verwezen naar Sieben (2002).

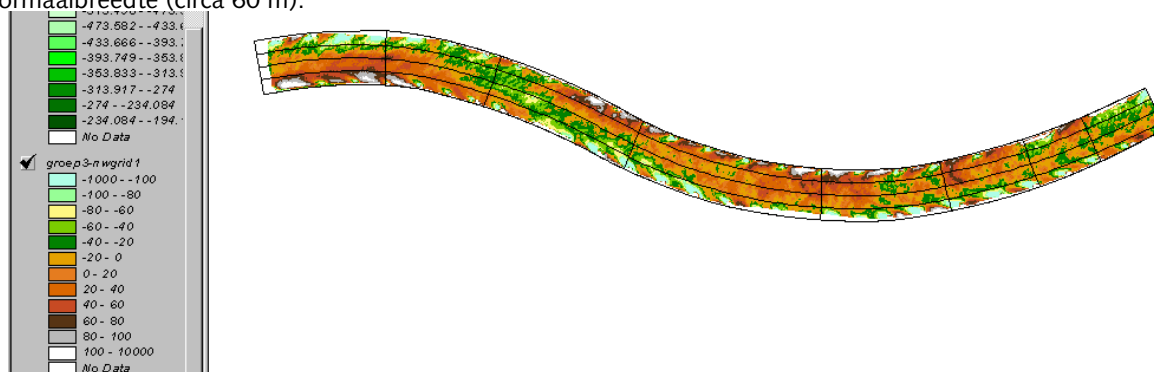
Indirect spelen parameters als talud, onderlinge kribafstand en oriëntatie t.o.v. de hoofdstroom via de gecombineerde ruwheid en/of effectieve breedte ook een rol in de grootschalige analyse. Deze parameters zijn echter net als de vormgeving van het worteleinde voornamelijk van belang voor de lokale, instantane processen (Tabel 2.3) die hier niet zullen worden beschouwd (WL, 1997). Van een aantal parameters kan de invloed kwalitatief worden beschreven.

4.2 vormgeving van de kribkop

Voor de Waal is grotendeels gekozen voor een puntoplegging van de stroming. De kwaliteit van de oplegging wordt sterk bepaald door de vormgeving. Voor een functioneel ontwerp van een kribkop is het uitgangspunt een *maximale* ondersteuning van de stroming, een *minimale* ontgronding bij de krib en een stroomsnelheid langs de oevers die de stabiliteit hiervan niet aantast (circa 0,3 m/s). De vorm van de kribkop beïnvloedt de *breedte* van de menglaag tussen de hoge snelheden in de hoofdgeul en de lage snelheden in het kribvak, en daarmee de *intensiteit* van de wervels die bij de kribkop wordt opgewekt. Hoe sterker de wervels, des te groter de lokale ontgronding. Een te grote ontgronding kan vervolgens de stabiliteit van de krib bedreigen.

In Hoffmans en Verheij (1997) worden een aantal voorspellingen gedaan van de afmetingen van deze ontgronding; tijdens gemiddelde condities kan een ontgrondingskuil worden verwacht van gelijke orde als de waterdiepte (4 á 5 m), met een maximum ontgronding op circa 8 á 12 m vanaf de kribkop, een lengte van circa 50 m en een breedte van 20 á 30 m (WL, 1997). Tijdens hoge afvoeren wordt een grotere ontgronding verwacht. Het erosieproduct uit de kuilen zou wellicht na hoogwater voor een tijdelijk overlast (sedimentatie) in de vaargeul kunnen zorgen. In het overzicht van Hoffmans en Verheij (1997) ontbreken echter waarnemingen in het prototype en de beschrijving in WL (1997) is beperkt. Dit duidt op een hiaat in de kennis over de ontgronding bij kribben en het gedrag tijdens (en na) hoogwater. Omdat het onderhoud aan kribkoppen aanzienlijk is (Verhoeven, 2001) is er reden om dit hiaat te vullen.

Een aanzet hiertoe kan als volgt. In tegenstelling tot duinen en ribbels die zich in benedenstroomse richting verplaatsen, zijn de lokale bodemvormen bij de kribkop min of meer stationair (plaatsgebonden). Door waargenomen bodemliggingen (multibeam) van het zomerbed te middelen en filteren (Van Essen en Sieben, 2001) kunnen uiteindelijk deze stationaire bodemvormen worden bekeken. In Fig.4.1 is hiervan een voorbeeld gegeven, de diepte van de kuilen (en de hierop volgende hobbels) bedraagt in binnen- en buitenbocht meer dan 1 m, de lengte van de ontgronding spreidt zich uit tot ongeveer een kwart van de normaalbreedte (circa 60 m).



Figuur 4.1 Weergave "stationaire bodemvormen" (Van Essen en Sieben, 2001).

Over de vorm en grootte van de stationaire bodemvormen is nog weinig bekend. Een (aanzet tot een) eenduidige relatie tussen kribparameters, hydraulische parameters en morfologische respons is echter pas mogelijk na kwantitatieve analyses van een voldoende groot aantal van tijd- en ruimtemiddelde waarnemingen.

Een flauwer kribkoptalud, met een bredere menglaag, een kleinere turbulentie-intensiteit en minder ontgronding, komt de stabiliteit dus ten goede. In WL (1959) is met een schaalmodel voor een aantal kribvormen de lokale bodemligging onderzocht; een flauwere helling van kribkop en kruin leidde inderdaad tot minder diepe ontgrondingen. Volgens WL (1997) wordt de maximale ontgrondingsdiepte bijna gehalveerd als een kribkoptalud van 1:3 wordt verflauwd naar 1:7. Een bredere menglaag kan echter ook leiden tot een grotere uitbuiging van stroomlijnen in de geul en hogere stroomsnelheden in het kribvak

(Meijer, 1998; Visser en Meijer, 1999). Ter illustratie, een verflauwing van 1:3,5 naar 1:7 zou gecompenseerd moeten worden met een 5% afname in normaalbreedte (kribverlenging) om een breedte-gemiddelde bodemverandering te voorkomen (Meijer, 1998). Voor een *goede ondersteuning* van de stroombanen is een *minimale uitwisseling* tussen hoofdgeul en kribvak van belang. In analogie met vormgeving van havenmonden of kanaal-aansluitingen (zie ook de eieren in Jansen *et al.* 1979) zou dan juist een *scherpe* benedenstroomse vorm van de kribkop ter ondersteuning van de stroming moeten worden toegepast. Petersen (1986) refereert aan modelproeven waaruit blijkt dat dit stroomlijnen van een kribkop (variërend van een hamerkrib tot een gedeeltelijke afsluiting van het kribvak) leidt tot een kleinere ruwheid en een verbeterde oplegging van de vaargeul.

Kortom, een flauwer kribkop talud kan leiden tot *minder lokale ontgronding* (= minder onderhoud), maar mogelijk ook tot een *langere krib* (=meer aanleg) om scheepvaart knelpunten te voorkomen. Pas als de grootte-orde van de verschijnselen en de relatie met de kribkopvorm bekend is, kan voor een aantal karakteristieke situaties (bv ter plekke van binnen- of buitenbocht, een rechtstand of in- of uittredende uiterwaardstroming) een optimale kribkop worden ontworpen. Voor een evaluatie van het effect van een open kribkop (palenrijen) wordt verwezen naar Sieben (2002).

4.3 onderlinge kribafstand

De optimale afstand tussen onderlinge kribben is sterk afhankelijk van lokale stromingscondities en de lokale kribfunctie. Er worden hier drie aspecten genoemd, voor alle drie geldt dat een volledige theoretische uitwerking ontbreekt.

1) oeverbescherming

Als het voornamelijk gaat om *bescherming van de oever*, dan is voor de onderlinge kribafstand vooral de kriblengte van belang. Immers, in geval van niet-gekromde stroming strekt de stroomluwe zone benedenstrooms van de krib zich uit over een lengte van ongeveer 5 maal de kriblengte (Bouwmeester, 1989). Veiligheidshalve noemt Lely (1890) een getal van 1 á 2 maal de kriblengte.

2) stroomgeleiding door neervorming

Als het gaat om het *concentreren (geleiden) van de stroming* in het zomerbed, dan moet de kribafstand zijn afgestemd op het beperken van uitbuiging in de stroombaan tussen kribvak en hoofdgeul. De ondersteuning van stroming gebeurt optimaal door een enkele stabiele neer. Zoals in Jansen *et al.* (1979) is beschreven, geldt voor een door stroming aangedreven neer dat de kribafstand kleiner is dan $\alpha C^2 a / g$, met een coëfficiënt $\alpha \approx 0,3$, a [m] de waterdiepte in de hoofdgeul, g [m/s²] de gravitatieconstante en C [m^{1/2}/s] de bodemruwheid in de hoofdgeul. Voor de Waal betekent dit een goede neervorming voor kribafstanden van circa 200 á 250 m (met $\alpha \approx 0,3$, $a = 4$ m; $g = 9,8$ m/s² en $C = 40$ á 45 m^{1/2}/s). Het blijkt dat in een rechtstand de stroming met neervorming goed wordt ondersteund bij kribafstanden van 0,5 tot 2 maal de kriblengte. Naarmate de rivier sterker is gekromd heeft stroming in buitenbochten een grotere ondersteuning nodig (kleinere kribafstanden in de buitenbocht).

3) beperking stroomlijnkromming

Tenslotte kan de normaalbreedte als relevante maat voor de kribafstand worden genoemd. Dit kan als volgt worden toegelicht. Bij het puntsgewijs opleggen van stroming worden *stroomlijnkrommingen* geïntroduceerd, met een golflengte gelijk aan de kribafstand. Deze krommingen verstoren het stroombeeld met een volgorde van versnelling (iets benedenstrooms van de kribkop) en vertraging (iets benedenstrooms van het kribvak). Deze verstoring kan hinderlijk zijn voor de scheepvaart en bovendien leiden tot vaarwegbeperkende bodemveranderingen. Om de grootte hiervan te beperken wordt gesteld dat de kribafstand in ieder geval beperkt moet blijven tot 1 á 2 maal de normaalbreedte (zie ook de opmerkingen in het gekleurde kader). Voor relatief smalle rivieren met scheepvaart zou de kribafstand zelfs beperkt moet blijven tot 0,5 á 1,0 maal de breedte (Bouwmeester, 1989).

Het criterium voor kribafstanden met beperkte stroomlijnkromming kan kwalitatief onderbouwd worden. Als aanpassingseffecten van snelheidsprofiel en sedimenttransport worden verwaarloosd (dit is waarschijnlijk niet helemaal het geval), dan kan het theoretische *breedtegemiddelde* effect van het door kribben veroorzaakte regelmatige verschuiven van de stroomdraad worden geschat met

$\frac{\Delta z}{a} \approx \frac{n-1}{n} \frac{\Delta B}{B} \approx 0,8 \frac{\Delta B}{B}$ met $\otimes z$ [m] de verondieping t.g.v. de divergerende stroombaan, a [m] de waterdiepte in de hoofdgeul (circa 4 m), $\otimes B$ [m] de grootte van de stroombaanuitbuiging in het kribvak (circa 20 m), B [m] de normaalbreedte (circa 260 m), en n de niet-lineaire afhankelijkheid tussen transport en stroomsnelheid ($n \approx 5$).

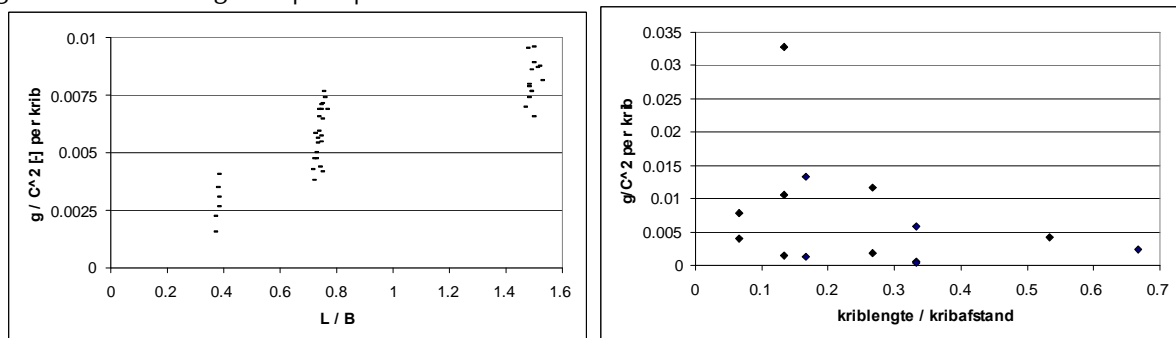
Veronderstel dat de uitbuiging van de stroombaan in het kribvak kan worden benaderd met $\frac{\Delta B}{2} \approx \frac{L}{6}$, met L [m] de afstand tussen twee kribben, dan wordt de amplitude van de bodemrespons $\frac{\Delta z}{a} \approx 0,3 \frac{L}{B}$.

Een grotere kribvakafstand en/of een kleinere stroomvoerende breedte levert een grotere bodemrespons.

Ter illustratie van de invloed van de kribafstand op de normalisatie bij gemiddelde afvoer, wordt in Fig.4.2 een indruk gegeven van de relatie tussen de wrijvingsfactor per kribvak en de onderlinge kribafstand en kribvakvorm, in een rechtstand. Op de horizontale as staan de verhouding tussen de onderlinge kribafstand L en de normaalbreedte B (linkerfiguur) en de verhouding tussen de kriblengte en de kribafstand L (rechterfiguur). Op de verticale as staat de dimensieloze bijdrage van een krib en kribvak aan de wrijving die de stroming ondervindt.

De waarnemingen in Fig.4.2 duiden erop dat zolang $L/B < 1$, de *totale* energiedissipatie per m rivier, die wordt geïntroduceerd door kribben min of meer *onafhankelijk* is van de onderlinge kribafstand. Immers, als over een rivierstuk een verdubbeling van kribafstand wordt toegepast, dan verdubbelt de dissipatie *per krib*. Maar omdat tegelijkertijd het aantal kribben halveert, blijft de totale ruwheidsbijdrage constant. Voor $L/B > 1$ lijkt de ruwheidsbijdrage *per krib* naar een constante waarde te gaan. In dat geval neemt de *gemiddelde* ruwheidsbijdrage met het aantal kribben min of meer lineair toe. Als verondersteld wordt dat een goede concentratie van stroming gepaard gaat met een minimale energiedissipatie in de kribvakken, dan zou Fig.4.2 betekenen dat voor $L/B < 1$, een verandering in kribafstand nauwelijks leidt tot een verandering in stroomregulerende werking.

De invloed van de kribvakvorm (rechterfiguur) lijkt in de range van waarnemingen niet relevant voor de grootte van de energiedissipatie per kribvak. De invloed van de kribvakbodem is hier niet beschouwd.



Figuur 4.2 Ruwheidsbijdrage per krib (WL, 1969).

Samenvattend kan worden gezegd dat, grotendeels op basis van empirie, de stroomregulering optimaal is met een stabiele neervorming. In een rechtstand is de kribafstand maximaal de normaalbreedte, ter beperking van ongunstige effecten door divergerende stroombanen. Op de Waal worden de kribben in de regel op onderlinge afstanden van 150 tot 200 m gelegd, op de Nederrijn en Lek bedraagt de afstand ongeveer 100 m, en op de IJssel minder dan 100 m.

4.4 oriëntatie van kribben

Er zijn drie mogelijkheden voor de oriëntatie van de krib ten opzichte van de stroming; inclinant (stroomopwaarts); loodrecht op de stroming of declinant (stroomafwaarts). Omdat het morfologisch effect van de oriëntatie moeilijk is te kwantificeren, is veelal de kortste krib (bij benadering loodrecht op de stroming) het meest aantrekkelijk. Desondanks een korte beschrijving van de beide andere mogelijkheden op basis van Bouwmeester (1989).

Declinante kribben (stroomafwaarts gericht).

Zonder scheepvaartgolven is er voor de kribkop sprake van een minder grote verstoring van het stroombeeld, met als gevolg een *minder grote ontgronding* bij de kribkop en effectief een grotere normaalbreedte. Als tijdens hoogwater de kribben worden overstroomd, dan wordt de stroming richting oevers afgebogen. Dit kan leiden tot een extra afvoeronttrekking uit de hoofdgeul, en een grotere aanval op de oeverlijn. De grootte van dit effect is afhankelijk van de diepte boven de kruin; voor grotere diepten neemt de invloed van de kriboriëntatie weer af. Volgens WL (1997) kan het verwachte rustiger stroombeeld de nautische veiligheid ten goede komen.

Inclinante kribben (stroomopwaarts gericht)

Zonder scheepvaartgolven is er sprake van een grotere contractie bij de kribkop. Door de oriëntatie lijkt de maximale ontgronding in de richting van de hoofdgeul te verschuiven (dus bij de oever en benedenstroomse krib vandaan). Bij hoogwater wordt stroming enigszins van de oeverlijn afgeleid richting hoofdgeul. Dit betekent effectief een goede concentratie van stroming in de hoofdgeul en een zekere bescherming van de oevers. Lely (1890) suggereert vervolgens nog dat bij inclinante ("vangende") kribben, meer zand achterblijft tijdens hoogwater. Op een aantal lokaties van de Waal met inclinante kribben is inderdaad sprake van sedimentatie tijdens hoogwater (o.a. Ewijkse Plaat (km 893) en Willemspolder (km 910)). Echter, uit de waarnemingen van sedimentatie na hoogwater (Sorber, 1997) lijkt vooral het stroombeeld van intredende, sedimentrijke stroombanen bepalend. De oriëntatie van de kribben speelt een waarschijnlijk kleine rol in de stabilisatie van het gesedimenteerde materiaal.

De oriëntatie van de krib t.o.v. de stroming kan dus een rol spelen in

- de grootte en ligging van de ontgrondingskuil
- de lokale normalisatie (normaalbreedte)
- de grootte van de uiterwaardstroming
- de snelheid van sedimentatie

Al deze aspecten hebben betrekking op een schaalniveau van de rivierbreedte; voor een functioneel kribontwerp op riviertak niveau lijkt de kriboriëntatie niet relevant.

Kwantitatieve relaties voor het effect van kriboriëntatie langs de Waal zijn nauwelijks beschikbaar, bovendien is het gebruik van waarnemingen (of hierop gebaseerde formules) in laboratoria en/of buitenlandse rivieren beperkt vanwege de intensieve scheepvaart. In de huidige kribontwerpen wordt veelal de kortste verbinding tussen oeverlijn en normaallijn gekozen. Echter, met een toenemend gewicht van bijvoorbeeld uiterwaard-sedimentatie (van belang voor de sedimenthuishouding op rivierniveau en de duurzaamheid van heringerichte uiterwaarden) worden de functionele aspecten belangrijker. Een verkenning gericht op de effecten van kriboriëntatie zou nuttig kunnen zijn om te beoordelen of het (toekomstig) functioneren op rivierbreedteniveau door middel van de kriboriëntatie kan worden verbeterd.

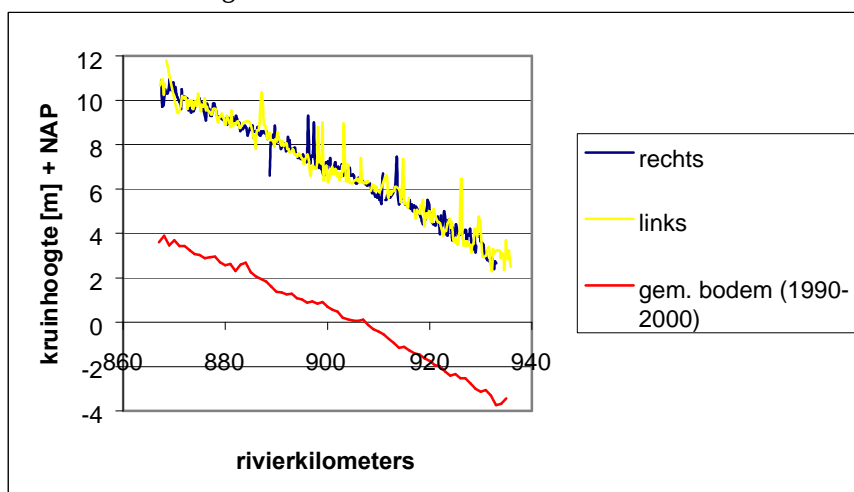
4.5 kruinhoogte

Voor wat betreft de grootschalige effecten (rivierniveau) kan worden geput uit ervaringsregels. Een algemeen uitgangspunt is dat kruinen kunnen worden aangelegd op een niveau ongeveer gelijk aan de waterstand waarbij een gewenste vaardiepte aanwezig moet zijn. Ten tijde van de normaliseringsgold daarvoor de gemiddelde rivierwaterstand (M.R.), zodat voor de kruinhoogte M.R. + 0,3 m werd gehanteerd. Omdat M.R. voor de beoordeling van de vaarbaarheid geen representatieve maat is, noemt Lely in Cockinga (1921) de normaal lage waterstand (N.L.W.=M.R.-1,0 m). Wellicht omdat de Nederlandse Rijntakken niet

maatgevend waren, werd voor de bevaarbaarheid de waterstand bij Keulen gebruikt in plaats van het N.L.W. Uiteindelijk werden bij de laatste normalisatie de kruinen op M.R. -0,5 m aangelegd. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat de zichtbaarheid van de krib voor alle waterstanden door bebakening voldoende wordt gegarandeerd. Om een definitie van een optimale hoogte te geven wordt opnieuw Lely (1890) geciteerd.

“Op grond van de omstandigheid, dat normalisatie voornamelijk ten doel heeft het vermeerderen der vaardiepte bij lage waterstanden en dat het aan den anderen kant wenschelijk is, het hoogwaterprofiel niet te veel te beperken, ten einde te voorkomen, dat de normalisatie verhooging der hoogwaterstanden ten gevolge heeft, wordt de hoogte der kribben bij den kop gewoonlijk op M.R. tot 0,3 M. daarboven vastgesteld. De kruin verkrijgt achterwaarts eene helling van 100 tot 200 op 1”.

Lely kiest dus voor een zo laag mogelijke kribkruin als uitvoeringstechnisch maar mogelijk is, met een minimumniveau van OLR. Desondanks wordt, vanwege een kwetsbare bebakening, gekozen voor M.R.+ 0,3 m, zodat de krib langer zichtbaar blijft voor de scheepvaart. In Fig.4.3 is het huidige verloop van kribkruinen langs de Waal weergegeven, samen met de bodemligging in de hoofdgeul gemiddeld over de periode 1990-2000. Hieruit blijkt dat de kruinen over de hele Waal circa 6,5 m boven de gemiddelde bodem liggen. Overigens, hierbij wordt aangenomen dat de gemiddelde bodemligging van de periode 1990-2000 representatief is voor de beoordeling van de kribben.



Figuur 4.3 Verloop Kribkruinen en bodemligging.

Door de kruinhoogten te combineren met de waterstandsoverschrijdingskromme kan Tabel 4.3 worden gemaakt. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de kribkruin t.o.v. de oorspronkelijke ontwerpregel met name in de Boven-Waal een overhoogte heeft. Ten opzichte van het minimum (OLR) bestaat een behoorlijke marge.

	Lely (1890)	Nijmegen	Tiel	Zaltbommel
kribkruin t.o.v. gemiddelde waterstand	0,30 m	1,12 m	0,82 m	0,80 m
kribkruin t.o.v. OLR (5% onderschreden)		2,83 m	2,52 m	1,99 m

Tabel 4.3 Relatieve kruinhoogten langs de Waal.

Volgens de oude vuistregel kunnen de kribben langs de Waal dus worden verlaagd, met ongeveer 0,8 m in de Boven-Waal, en 0,5 m in de Midden-Waal en Beneden-Waal. Het is echter de vraag of, gezien de toegenomen scheepvaartbelangen, deze regel nog steeds een optimale kribkruin oplevert.

Tenslotte kan worden opgemerkt dat ook voor het risico op oevererosie (en achterloopsheid) de kruinhoogte relevant kan zijn; volgens een ontwerpregel zou de kribkruin vanwege oeverbescherming (en achterloopsheid), niet hoger dan het lokale niveau van de oever moeten liggen om concentratie van stroming bij de relatief kwetsbare aansluiting met de oever te voorkomen (Bouwmeester, 1989).

4.6 Conclusies

Uit het overzicht van de verschillende kribparameters blijkt dat globale regels voor dimensionering voor handen zijn. Voor een optimalisatie met betrekking tot lokale condities ontbrak in het rivierbeheer de noodzaak, en daarmee het motief voor kennisontwikkeling. Dit impliceert dat de huidige kribontwerpen zijn gebaseerd op

- vuistregels voor grootschalige riviermorphologie (riviertak-gemiddelde benaderingen)
- economische overwegingen voor aanleg, beheer en onderhoud

Uitgangspunten voor een ruimtelijk ontwerp zijn bijvoorbeeld

- kruinhoogten van kribben kunnen worden aangelegd 0,3 m boven de gemiddelde rivierwaterstand
- onderlinge kribafstanden zijn kleiner dan de normaalbreedte
- kribkoppen liggen op een vloeiende lijn

Voor het huidige rivierbeheer is dit voldoende. Het is echter onzeker of dit voldoende zal zijn voor de toekomst, met het oog op de voorgenomen grootschalige herinrichting (RVR) van de rivier, de hogere eisen voor de scheepvaart en een andere beheersfilosofie (bv. een dynamischer rivierbeheer) als uitgangspunt. Op basis van het overzicht in dit hoofdstuk kan worden geconcludeerd dat er geen/onvoldoende kennis voorhanden is, over de invloed van verschillende kribparameters op

- 1) lokale ontgrondingen (in relatie tot de kribkopvorm)
- 2) lokale normalisatie
- 3) snelheden langs de oeverlijn
- 4) lokale uiterwaardsedimentatie en –erosie (inclusief achterloopsheid)

Voor de eerste drie punten lijkt bijvoorbeeld de vorm van de kribkop en de onderlinge kribafstand relevant, terwijl het derde en vierde punt van belang kunnen zijn voor de morfodynamica in uiterwaarden. Om de kennis uit te breiden, zou vooraleerst

- prototype-waarnemingen moeten worden gedaan en geanalyseerd om grootte-orden te bepalen
- theoretische verkenningen moeten worden uitgevoerd om kwalitatieve relaties te formuleren

Met hypothesen die hieruit volgen kan vervolgens onderzoek worden gedaan naar het effect van verbeteringen in het ruimtelijk ontwerp van een *lokale* riviernormalisatie. Vooralsnog lijkt de strategie voor een functioneel kribontwerp:

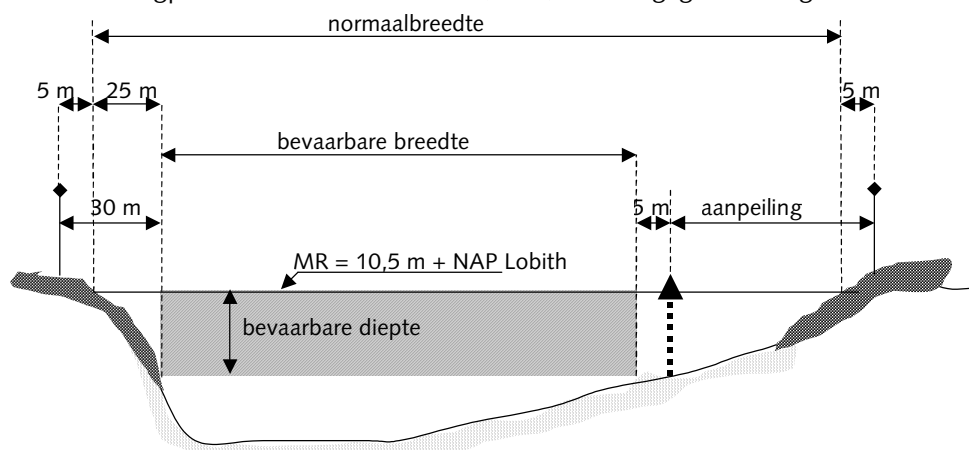
- bepaal een riviertak-gemiddeld ruimtelijk ontwerp (op basis van de huidige uitgangspunten voor ontwerp)
- optimaliseer het gemiddelde ruimtelijk ontwerp op basis van condities op rivierbreedte-niveau (5 á 10 km), binnen de mogelijkheden van de huidige kennis.

Hoofdstuk 5 Normalisatie t.b.v. de scheepvaart

5.1 Inleiding

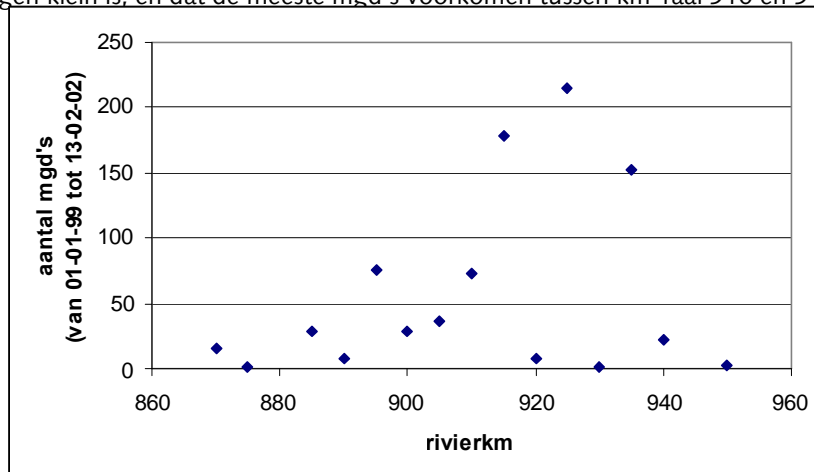
In het vorige hoofdstuk zijn de belangrijkste parameters geïnterpreteerd die het functioneren van kribben beïnvloeden. Vervolgens werd geconcludeerd dat voor de dimensionering van de normalisatie op rivierniveau, de oude, beproefde regels worden toegepast. Omdat het de vraag is of deze regels met het toekomstige riviergebruik nog steeds leiden tot een optimaal "functioneren" van de rivier, wordt in dit hoofdstuk gezocht naar de relatie tussen de functionele eis t.b.v. de scheepvaart (Sectie 2.3) en de kruinhoogte uit het ruimtelijk kribontwerp (Sectie 2.5). Centraal staat in dit hoofdstuk de kribkruin op rivierniveau; voor lokale condities kan de kribkruin immers een afwijkend, lokaal optimum hebben

Voor de technische eisen van de scheepvaartfunctie geldt vooral dat het nautisch profiel (170 m breed en 2,8 m diep bij OLR) en de zichtlengte volgens de richtlijnen moet worden gehandhaafd, en dat de oever bestand moet zijn tegen de hydraulische belastingen als gevolg van scheepvaart (tenzij erosie mag optreden). De definitie van het vaarwegprofiel is ontleend aan RWS (1990) en weergegeven in Fig.5.1.



Figuur 5.1 Vaarbaan definitie (RWS (1990)).

Uitgangspunt is de handhaving van de gewenste vaarweg bij de overeengekomen lage rivierstand (OLR), bij onveranderde normaalbreedte. De belangrijkste oorzaken voor scheepvaartknelpunten zijn, zoals beschreven in RWS (1991) de bochtstraal, beddingvormen (na hoogwater), rivierkundige werken (veranderingen in belijning) en hoogwatereffecten ter plekke van aangetakte ontzandingen (Ijzendoorn, Druten) en bij niet-uniforme afvoerdeling tussen winterbed en zomerbed (Sectie 3.6). Dit laatste betreft niet alleen bodemveranderingen ter plekke van "stroomverlammingen", maar ook, waar de afvoer in de hoofdgeul terugkeert, erosie van kribvakken en sedimentatie in de hoofdgeul. Voor een overzicht van rivierstukken met frequente scheepvaartknelpunten zie bijvoorbeeld het BOS-baggeren. In Fig.5.2 is per rivierstuk van 5 km het aantal meldingen van minst-gepeilde-diepten (mgd) weergegeven voor de periode 01-01-1999 tot 13-02-2002. Deze data zijn afkomstig van het BOS Baggeren. Uit Fig.5.2 valt op te maken dat in de BovenWaal en het aantal meldingen klein is; en dat de meeste mgd's voorkomen tussen km-raai 910 en 940.



Figuur 5.1 Verdeling mgd's langs de Waal (bron, BOS Baggeren).

In Bijlage A is een eenvoudige relatie gelegd tussen de functie-eisen voor de vaarweg en een profiel-gemiddelde diepte. De vaarwegdiepte in het nautisch profiel van 170 m breed, is 2,8 m diep als de profielgemiddelde diepte ongeveer 3,6 m bedraagt (in geval van een nautisch profiel van 150 m bij 2,5 m is de bijbehorende waterdiepte ongeveer 2,9 m). Dit betekent dat met de formule van Chézy (Verg.5.1-b) de

$$(toekomstige) \text{ vaarwegdiepte benaderd kan worden met } a_{\text{vaarweg}} \approx \left(\frac{Q_{OLA}}{BC\sqrt{i}} \right)^{2/3} - 0,8 \quad (5.1-a)$$

(voor de huidige norm is het 0,4 m i.p.v. 0,8 m). De formule van Chézy legt een eenduidige relatie tussen Waalafvoer en waterdiepte die voor afvoeren onder 4.000 m³/s goed overeenkomt met betrekkinglijnen. Ter indicatie, op dit moment is volgens Verg.5.1-b) de diepte die 5% van de tijd wordt onderschreden 3,61 m (met $B = 260$ m; $C = 45$ m^{1/2}/s; $i = 10^{-4}$ en $Q_{OLA} = 804$ m³/s (5% onderschreden)). Bij de huidige bodemhelling, en de numerieke waarden zoals gebruikt, zou volgens Verg.5.1-a de toekomstige norm net haalbaar moeten zijn, maar veel ruimte voor onzekerheden is hier niet.

Bij een vastgestelde normaafvoer Q_{OLA} door de Waal, en een onafhankelijke bodemruwheid is de vaarwegdiepte alleen nog te beïnvloeden door de stroomvoerende breedte B en het bodemverhang i . Omdat de stroomvoerende breedte constant wordt gehouden (behoudens lokale correcties), wordt de vaarwegdiepte in de huidige situatie dus alleen beïnvloed door het bodemverhang. Veranderingen in de bodemhelling leiden tot veranderingen in de vaarwegdiepte. Dit verklaart voor een deel de integrale bodemdaling (met onveranderde bodemhelling, zie Fig.3.1) als resultaat van het huidige (en recente) rivierbeheer zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Dit betekent dat een kribontwerp op rivierniveau, voor wat de scheepvaart betreft, moet zijn gericht op het handhaven of verlagen van de bodemhelling.

5.2 Model voor grootschalige morfologie

Zoals in Bijlage B is beschreven, kan de diepte-eis bij een overeengekomen lage afvoer (OLA) worden uitgedrukt in een maximale bodemhelling. Dit kan als volgt worden toegelicht. Met de formule van Chézy kan de profielgemiddelde waterdiepte worden geschreven als

$$a_m = \left(\frac{Q_{OLA}}{BC\sqrt{i}} \right)^{2/3} \quad (5.1-b)$$

met

a_m	[m]	profielgemiddelde waterdiepte
B	[m]	stroomvoerende breedte
C	[m ^{1/2} /s]	Chézy coëfficiënt
i	[-]	bodemverhang
Q_{OLA}	[m ³ /s]	Overeengekomen Lage Afvoer (jaarlijks circa 5% onderschreden)

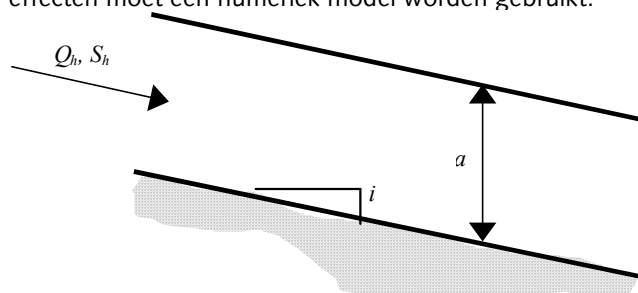
Omdat de bodemhelling onder andere wordt bepaald door de afvoerfractie over de kribben, kan voor deze maximale bodemhelling de bijbehorende grootte en frequentie van kribafvoer worden bepaald. Hiervoor is een eenvoudig model voor de grootschalige morfologie nodig. Afhankelijk van de lengteschaal L van een maatregel zijn benaderingen mogelijk om vuistregels af te leiden. De analyse in dit hoofdstuk is gericht op grootschalige processen (lengte van de riviertak). Er is voor wat betreft hydraulica sprake van een grote lengteschaal L , als geldt $L \gg L_{1/2}$ met de halveringslengte gedefinieerd als

$$L_{1/2} \approx \frac{0,24}{i_b} \frac{a_e}{a_b} \approx \frac{0,24 \times 4 \text{ m}}{0,0001} = 10 \text{ km} \quad (\text{met een evenwichtsdiepte } a_e \text{ en een bodemhelling } i_b). \text{ Dus, een}$$

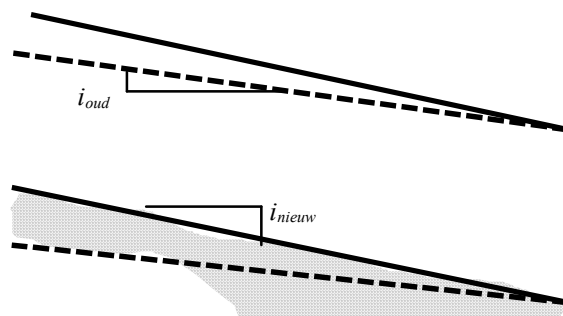
rivierstuk van minstens 50 km. Omdat veranderingen in een rivierbodem door middel van bodemgolven in benedenstroomse richting voortplanten is de lengteschaal L van een ingreep via een karakteristieke voortplantingssnelheid ook verbonden aan een tijdschaal; een grote (kleine) lengteschaal komt overeen met een grote (kleine) tijdschaal.

Voor ingrepen met een grote lengteschaal geldt bij benadering *uniforme stroming* (met verwaarloosbare veranderingen in de profielgemiddelde stroomsnelheid). Voor uniforme stroming kan een vereenvoudigd model voor de een-dimensionale riviermorfologie worden opgesteld, waarbij de stroming en morfologie wordt vereenvoudigd tot de variabelen zoals gedefinieerd in Fig.5.2 (Mosselman en Struiksmá, 1992). Hier

wordt slechts gekeken naar een *evenwichtssituatie* (bodempelling en waterdiepte); voor tijdsafhankelijke effecten moet een numeriek model worden gebruikt.



Figuur 5.2-a Definitie schets grootschalige morfologie.



Figuur 5.2-b Definitie schets grootschalige veranderingen.

Hierin is

a	[m]	de profielgemiddelde diepte in de hoofdgeul
i	[-]	het bodemverhang
Q_h	[m ³ /s]	de afvoer door de hoofdgeul
S_h	[m ³ /s]	het sedimenttransport door de hoofdgeul

Er zijn twee variabelen (diepte a en bodempelling i waarmee het systeem (de rivier) kan reageren op veranderingen (ingrepen). Er zijn twee voorwaarden die de waterdiepte en de bodempelling in een oplossing dwingen; een waterstand op de benedenstroomse rand en een (combinatie van afvoer en) aanbod van sediment op de bovenstroomse rand. Voor de eenvoud wordt de invloed van de benedenstroomse rand (riviermond) constant verondersteld; als de bodempelling verandert, scharniert deze rondom de bodemligging in de riviermond.

Door combinatie van de formules kan de diepte geëlimineerd worden en blijft alleen de bodempelling over als onbekende. Om uiteindelijk de relatie tussen kribhoogte en de bodempelling en waterdiepte te bepalen, wordt de jaarlijkse zandvracht in de oude (originele) situatie bepaald en vergeleken met de situatie na herinrichting. Met de afgeleide uitdrukking voor de jaarlijkse zandvracht door de hoofdgeul kan dan een nieuwe bodempelling worden gevonden (Bijlage B, dit is gebaseerd op de afleiding in De Vries (1994)).

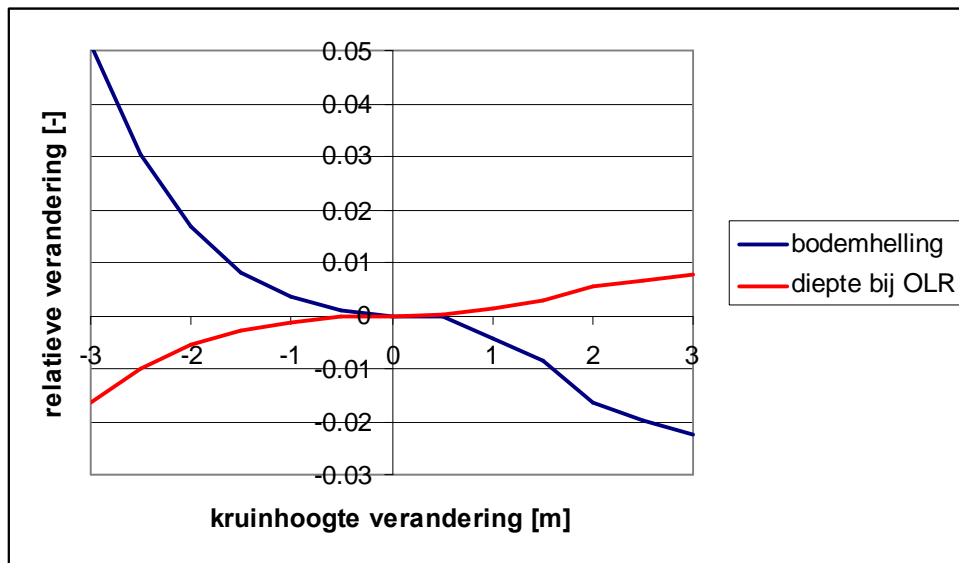
5.3 Relatie kruinhoogte en zomerbedmorfologie

Zoals in Bijlage B is beschreven, kan de verandering in bodempelling als functie van de grootte en frequentie van de kribafvoer worden geschat. In hoofdstuk 6 wordt de relatie tussen kruinverlaging en kribafvoer bepaald zodat het ruimtelijk ontwerp met een volledige effectbepaling kan plaatsvinden (Fig.6.2-a en -b). Deze afvoerrelatie uit Hoofdstuk 6 is toegepast om de verandering in bodempelling als gevolg van kribverlaging te schatten. Dit betekent dat voor de uitwerking een spreadsheet is gebruikt. Uit de schatting in Bijlage B blijkt dat de evenwichtswaarde van de bodempelling niet zo gevoelig is voor een toename in de kribafvoer.

De verandering in bodempelling kan, ter indicatie, nog worden vertaald naar een maximale bodemverandering (ter plekke van de Pannerdensch Kop) met $10 \text{ m} * (i_{\text{nieuw}} - i_{\text{oud}}) / i_{\text{oud}}$. Met de formule van Chézy voor uniforme stroming kan de verandering in bodempelling vervolgens nog worden vertaald in een

diepteverandering (Verg.5.1-a). Dit leidt tot $\frac{a_{\text{nieuw}}}{a_{\text{oud}}} = \left(\frac{i_{\text{nieuw}}}{i_{\text{oud}}} \right)^{-1/3}$ Hiermee kan tenslotte ook het effect op

de diepte bij OLR worden gepresenteerd. De trend is een iets grotere diepte bij hogere kribben en lagere kribafvoer. Met een maximale dieptevermindering als uitgangspunt, kan met behulp van de bovenstaande formules de relatie gevonden worden tussen de maximale kribafvoer als functie van de kruinverlaging. Dit is in Fig.5.5 weergegeven. Volgens Tabel 4,3 is de maximale kruinverlaging in de orde van 2 m (2,8 m op de Boven-Waal, 2,5 m op de Midden-Waal en 2,0 m op de Beneden-Waal). De verwachte bodemverandering bij de Pannerdensch Kop bedraagt ongeveer 0,2 á 0,3 m. Ter indicatie, de decade-gemiddelde bodemdaling bij de Pannerdensch Kop is ongeveer 0,026 m/jaar in de periode 1960-1990. De geschatte diepteverandering bij OLR blijft bij deze grootschalige bodemverandering beperkt tot circa 0,02 m.



Figuur 5.5 Relatie kruinhoogte en verandering bodempelling en diepte bij OLR.

Op basis van dergelijke globale analyses (zie ook Mosselman en Struiksmā (1992)) kan worden geconcludeerd dat de kruinhoogte voor de *grootschalige* sedimenthuishouding (en hieraan gekoppeld de grootschalige bodemontwikkeling) van minder groot belang lijkt te zijn. De invloed van de *lengte* van kribben (of de effectieve normaalbreedte) is in Bijlage B geschetst.

5.4 Lokale optimalisatie

In het voorgaande is gezocht naar een kruinhoogte op rivierniveau. Zoals ook opgemerkt door Mosselman en Struiksmā (1992), kan bij verlaagde kribben de lokale invloed van uiterwaarden belangrijker worden. Dit aspect kan goed verkend worden door (met WAQUA berekende) stroombeeldveranderingen door kribverlaging te analyseren. Voor wat betreft *lokale* situaties in bijvoorbeeld bochten, bij sterke wisselingen in hoofdgeul- en uiterwaardafoer, bij veranderingen in oeverbelijning (vernauwingen of overgangen tussen gestrekte oevers en kribben) kan het aantrekkelijk zijn om af te wijken van een kruinhoogte die optimaal is op het grootschalige rivierniveau. Een correctie van de variatie in hoofdgeulafoer kan bijvoorbeeld hoogwatereffecten (Sectie 3.2) verminderen. Om dit te onderzoeken wordt een verkenning uitgevoerd naar het effect van lokale kruinhoogteverandering op de afoervariatie in de hoofdgeul.

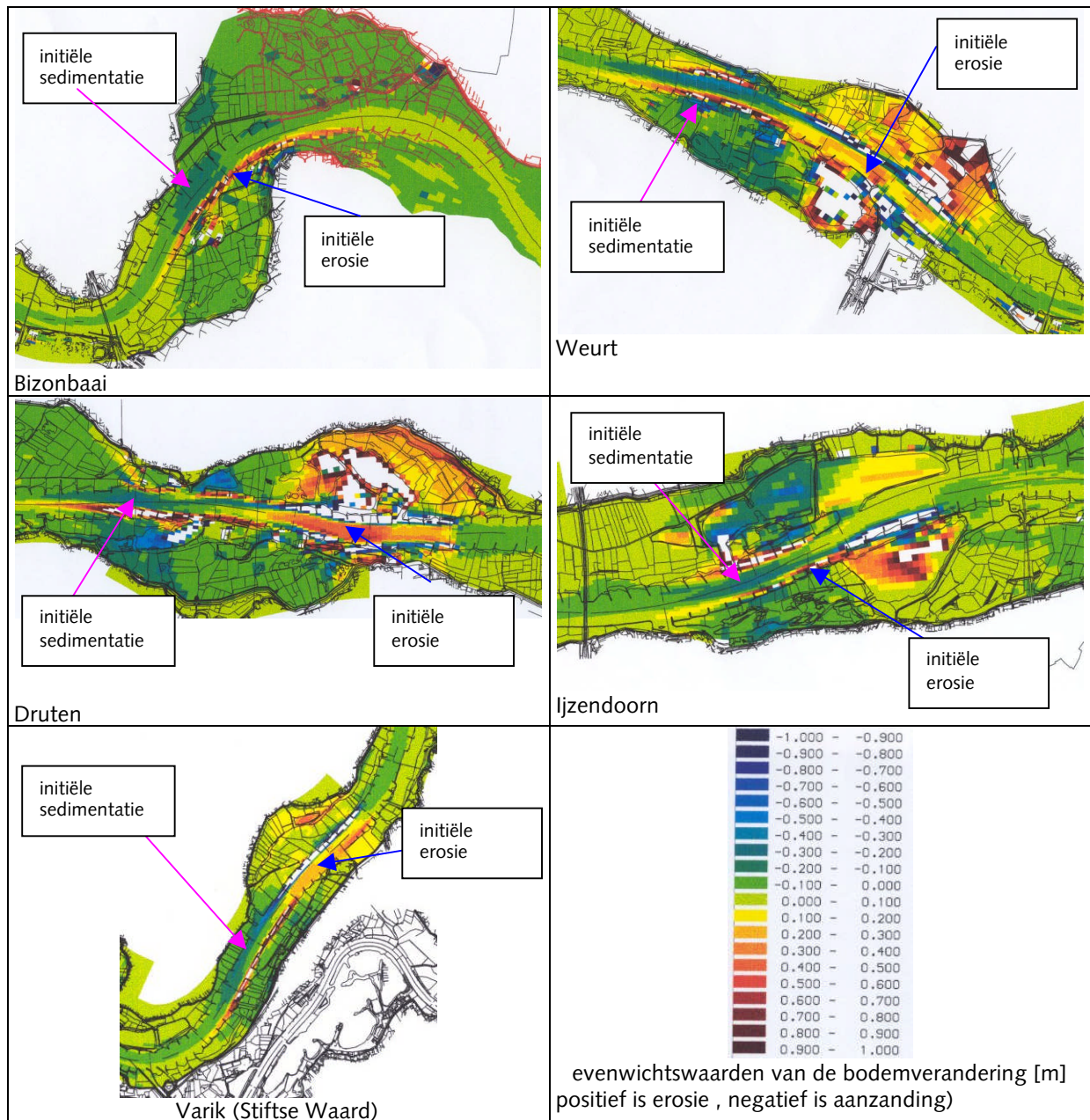
De vraag is of door variaties in het kribontwerp deze afoerverdeling tijdens hoogwater gedeeltelijk gecorrigeerd kan worden zonder verhoging van maatgevende waterstanden. Om dit te onderzoeken is met WAQUA de verandering in stroming berekend (bij een Waalafvoer van 8.000 m³/s) ten gevolge van de volgende ingrepen. Gekozen is voor een gecombineerde ingreep van een verhoging gevolgd door een verlaging, zodat er geen netto opstuwing bij maatgevende condities optreedt.

Lokatie	km-raai	Ingreep	oever
Bizonbaai	877- 879	1,5 m kruinverhoging	links
	880- 882	1,5 m kruinverlaging	links
Weurt	886- 888	1,5 m kruinverhoging	links en rechts
	888- 890	1,5 m kruinverlaging	links en rechts
Druten	898- 900	1,5 m kruinverhoging	links en rechts
	900- 902	1,5 m kruinverlaging	links en rechts
Ijzendoorn	907- 908	1,5 m kruinverhoging	links en rechts
	908- 909	1,5 m kruinverlaging	links en rechts
Varik (Stiftse Waard)	920- 922	1,5 m kruinverhoging	rechts
	922- 924	1,5 m kruinverlaging	links

Tabel 5.4 Overzicht ingrepen ter verkenning afoervergeregeling bij hoogwater

Om een indruk te krijgen van de verwachte bodemverandering ten gevolge van de ingreep, wordt in de volgende figuren $a \propto q/q$ geplot. Dit is de evenwichtswaarde van de bodemverandering (met een min-teken).

De *actuele* waarde van de bodemverandering is waarschijnlijk een fractie van deze *evenwichtswaarde* (zie bijlage C), bovendien worden allerlei translatiegolven als gevolg van de door de ingreep tijdens hoogwater opgewekte bodemveranderingen hier niet beschouwd. Een volledige theoretische onderbouwing ontbreekt echter vooralsnog. Hier kan verwezen worden naar Struiksma en Stolker (2000).



Figuur 5.8 Overzicht geschatte initiële bodemveranderingen t.g.v. lokale verandering in kruinhoogte.

De evenwichtswaarden van de lokale bodemveranderingen zijn in de orde van 0,2 m. De ingrepen leidden allen tot kleine lokale *waterstandsverlagingen* (maximaal 0,015 m). Geconcludeerd kan worden dat door lokale veranderingen in kruinhoogte, het ruimtelijk stroombeeld (en mogelijk ook de morfologische effecten hiervan) gedeeltelijk gecorrigeerd kan worden. Als deze morfologische interpretatie van de hydraulische correctie juist is, kan dit betekenen dat voor een kribontwerp op een lengteschaal van een aantal malen de rivierbreedte (circa 2 km) een lokaal optimum voor de kruinhoogte kan worden vastgesteld door bijvoorbeeld te streven naar een minimale afvoervariatie tussen de normaallijnen.

Als een *voorlopig* ontwerpcriterium ter indicatie van de jaargemiddelde, verwacht bodemverandering wordt voorgesteld dat de maximale bodemverandering bij een representatieve afvoer (bv. $Q_{Waal} = 2.600 \text{ m}^3/\text{s}$ met

een bijbehorende waterdiepte van circa 8 m) kan worden geschat met $\Delta z_{\max} \approx -0,9 \frac{\Delta Q_h}{Q_h} a$ (zie ook

Bijlage C). Als, conform de criteria voor de aanzanding t.g.v. nevengeulen, wordt gesteld dat

$\Delta z_{\max} < 0,2 \text{ m}$, dan is de maximale relatieve verandering in de hoofdgeulafvoer $-\frac{\Delta Q_h}{Q_h} < 0,05$. Dit

betekent tenslotte dat voor de maximale verandering in kribafvoer geldt $\frac{\Delta Q_{\text{krib}}}{Q_{\text{krib}}} < 0,05 \frac{Q_h}{Q_{\text{krib}}}$. Als de

verhouding tussen kribafvoer en hoofdgeulafvoer ongeveer 0,05 bedraagt, dan mag de kribafvoer met maximaal 100% toenemen om de maximale lokale aanzanding in het zomerbed tot 0,2 m te beperken. Op het moment van schrijven is een dergelijk niet-geverifieerd ontwerpcriterium slechts een voorlopige.

5.5 Conclusies

De analyses in dit hoofdstuk leiden tot de volgende conclusies.

riviertakniveau

- In de periode 1999-2002 zijn de meeste mgd's (minst gepeilde diepte) waargenomen tussen km 910 en 940. Met uitzondering van de scherpe bochten (o.a. Hulhuizen) lijkt er op de BovenWaal ruimte voor kleinere waterdiepten.
- De kruinhoogte en kribafvoer beïnvloeden de bodemligging (en waterdiepten bij OLR) op grootschalig niveau waarschijnlijk in kleine mate; lagere kribben kunnen leiden tot een iets *grotere* bodemhelling (maximaal 2%) en iets *kleinere* waterdiepten (maximaal 0,5%). Deze numerieke waarden horen bij een onveranderde afvoerverdeling over de Rijntakken.
- Ten behoeve van de scheepvaart (geen diepteafname bij OLR) moet worden gestreefd naar een onveranderde evenwichtswaarde van de bodemhelling. De invloed van de kruinhoogte hierop is beperkt. Vanwege de hoge eisen aan de vaarbaandiepte en breedte mag de stroomvoerende breedte niet toenemen.
- Het verlagen van de kribkruinen leidt tot een toename in snelheid over de kribvakken. Dit kan (initieel) een grotere erosie van de oeverzone tijdens hoogwater veroorzaken.

riverbreedte niveau

- Een lokale variatie in kruinhoogte over een lengte van een aantal malen de rivierbreedte (ca 1 km) kan de variatie in hoofdgeulafvoer tijdens een hoogwater met circa 2 á 5 % corrigeren. Ter plekke van een stroomverlamming (bij stroming richting uiterwaard) kan door kruinverhoging de stroomsnelheid worden verhoogd (*nb, kruinverhoging kan afhankelijk van de stromingscondities ook leiden tot het tegenovergestelde effect*), en ter plekke van een stroomversterking (bij schaarlijken of versmallingen) kan door kruinverlaging de toename in stroomsnelheden worden gedempt.
- Een lokale variatie in kruinhoogte beïnvloedt tijdens hoogwater de grootte van de stroomsnelheden in de hoofdgeul. Deze invloed kan bij een ingreep van 1 km over het gehele dwarsprofiel reiken.
- Door een lokale kruinverhoging te combineren met een lokale kruinverlaging van gelijke grootte en over een vergelijkbare lengte aan dezelfde oever, kan de opstuwing van maatgevende waterstanden worden voorkomen.
- Een combinatie van kruinhoogteveranderingen aan beide oevers kan tijdens hoogwater de snelheidsverdeling in de hoofdgeul corrigeren; lagere kruinen in de buitenbocht gecombineerd met hogere kruinen in de binnenbocht leiden volgens WAQUA tot een afname in stroomsnelheid in de buitenbocht en een toename in stroomsnelheid in de binnenbocht.
- Het effect op stroomsnelheden in de oeverzone (incl. de kribvakken) is tegengesteld aan het effect op stroomsnelheden in de hoofdgeul. Ter plekke van een lokale kruinverhoging nemen stroomsnelheden in de oeverzone af; dit kan (in een buitenbocht) het risico van oevererosie verminderen. Ter plekke van lokale kruinverlaging nemen stroomsnelheden in de oeverzone toe; dit kan (in een binnenbocht) leiden tot een toename in sedimentatie op en langs de oever.
- Als bovengrens voor het effect van variaties in lokale kruinhoogte wordt een bodemverandering (tijdens hoogwater) van circa 0,2 m geschat. Dit is een grove schatting; het effect van de

stroomsnelheidsveranderingen op de lokale bodemligging in hoofdgeul en oeverzone is nog onbekend.

- Vooralsnog wordt gebruikt dat de kribafvoer lokaal maximaal een factor 2 mag toenemen om aanzanding in het zomerbed te beperken.

Hoofdstuk 6 Afvoercapaciteit

6.1 Inleiding

Als onderdeel van de rivier dienen kribben een goede afvoer van water en sediment mogelijk te maken. De opstuwing door kribben wordt bepaald met lokale overlaatrelaties als interne randvoorwaarden in het numerieke model voor waterbeweging (WAQUA). Deze relaties, en de toepassing in WAQUA, zijn voorsnog niet geverifieerd met metingen in het prototype. De belangrijkste parameters voor energieverliezen bij kribben zijn in de afvoerrelaties in WAQUA een functie van de mate van volkomenheid, de energiehogte bovenstrooms van de krib en het hoogteverschil tussen de kruin en het aansluitende benedenstroomse maaiveld. Uitgangspunt van deze afvoerrelaties is een vaste vorm met een kruinlengte van 3 m en taluds van 1:4.

In dit hoofdstuk wordt op basis van de afvoerfunctie gezocht naar een ruimtelijk ontwerp van het dwarsprofiel van een krib. In Bloemberg (2001) staat een experimentele analyse beschreven naar de invloed van een overstroomd zomerkadeprofiel op het lokale energieverlies. In Sieben (2001) is dit verslag gecombineerd met andere waarnemingen en in een overlaatformulering samengevat. Deze formulering is geldig voor

- een rechtaangestroomde, trapeziumvormige overlaat
- uniforme stroming boven- en benedenstrooms van de overlaat
- ruwheidswaarden van het kadeprofiel die varieerden tussen $\frac{1}{4}$ en $\frac{1}{2}$ maal de waterdiepte

Vanwege het beperkt aantal waarnemingen dat voor verificatie ter beschikking stond is de formulering niet alleen beperkt tot een vaste ruwheidswaarde van de overlaat, maar bovendien tot een vast hoogteverschil tussen overlaatkruin en benedenstrooms maaiveld van circa 1,5 m.

Als wordt aangenomen dat deze waarnemingen (en de hierop gebaseerde formulering) representatief zijn voor energieverliezen bij kribben, dan kan de volgende optimalisatie worden gevolgd.



Figuur 6.1 Kribkruin met benedenstroomse sedimentatie na hoogwater (stroming van rechts naar links).

6.2 Overlaatformulering

Veronderstel dat de afvoer over de kribben kan worden geschreven als

$$q = C_{d0} \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \sqrt{g} H_1^{3/2} \sqrt{1 - (H_2 / H_1)^p} \quad (6.1)$$

met :

g [m/s ²]	gravitatieconstante
H_1 [m]	bovenstroomse energiehogte, t.o.v. de kruinhogte
H_2 [m]	benedenstroomse energiehogte, t.o.v. de kruinhogte

m_d [-]	benedenstrooms talud van de overlaat
q [m ² /s]	afvoer per meter breedte over de overlaat

In Verg.6.1 zijn de volgende twee coëfficiënten gebruikt.

C_{d0} [-]; de afvoercoëfficiënt voor volkomen stroming te bepalen met

$$C_{d0} = 0,85 \left(e^{-0,15H_1/L_k} \left[1,00 - 0,25e^{-0,5m_u} \right] + \left(1 - e^{-0,15H_1/L_k} \right) \left[0,8 + 0,65e^{-0,1m_d} \right] \right)$$

p [-]; de coëfficiënt voor benedenstroomse effecten, te bepalen met het benedenstroomse profiel volgens

$$p \approx 3,375 \frac{e^{0,02m_d}}{C_{d0}^2} \left(1 + \frac{\Delta z_d}{h_1} \right)^2 \left(\frac{h_1}{\Delta z_d} + 1 - e^{-0,01m_d} \right)^2$$

Hierin is L_k [m] de kruinlengte, m_u [-] het bovenstrooms talud van de overlaat, m_d [-] het benedenstrooms talud van de overlaat, en Δz_d [-] de benedenstroomse drempelhoogte (de kruinhoogte t.o.v. het benedenstroomse maaiveld).

Verg.6.1 is beperkt tot het volgende toepassingsgebied

relatieve overlaat/lengte ;	$0,5 < H_1/L_k < 2,0$ (korte overlaten)
relatieve stapgrootte;	$1,0 < \Delta z/H_1 < 4,0$ (hoge overlaten)
mate van volkomenheid q/q_v ;	$0,2 < q/q_v < 1,0$ (verdrongen en vrije stroming)

Voor kribben met een kruinbreedte van 3 m en een variërende stapgrootte van ongeveer 1 á 4 m is Verg.6.1 daarom beperkt tot energiehogten tussen 1,5 en 4 m. Dit toepassingsgebied is slechts een deel van de condities in het prototype.

Veronderstel dat het verval over de kribvakzone gelijk is aan het verval over de rivieras. Dit betekent dat, als het verval in de kribvakken wordt verwaarloosd, de afname in energiehogte per kribvak kan worden

$$\text{geschreven als } \frac{H_1 - H_2}{L_{\text{kribvak}}} = i_{\text{rivier}} \text{ met } L_{\text{kribvak}} = 200 \text{ m en } i_{\text{rivier}} = 10^{-4} \quad (6.2)$$

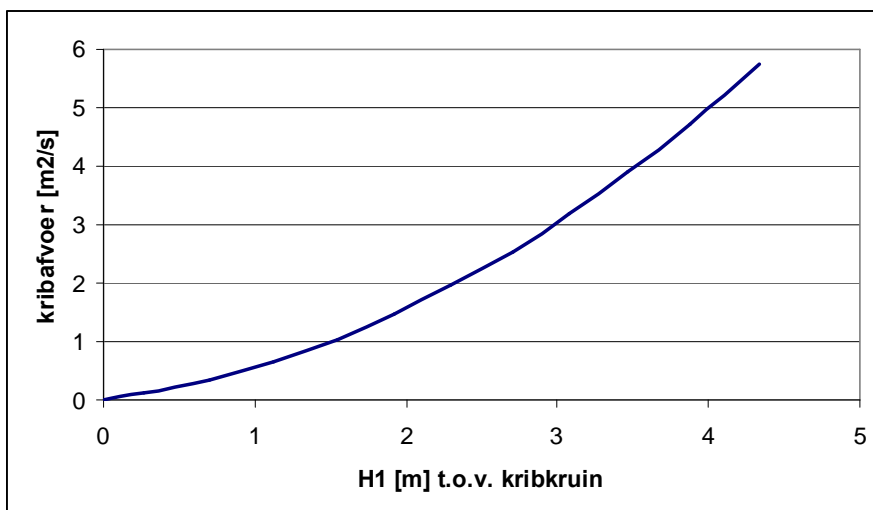
Tijdens hoogwaters met relatief grote waterdiepten boven de kruin is het verwaarlozen van de kribvakruwheid niet juist, het relatieve aandeel van de kribvakruwheid wordt dan groter. Omdat de overstroomde krib de snelheidsprofielen tot ver in het kribvak zal beïnvloeden, lijkt een eenvoudige aanpak (sommatie van ruwheidsbijdragen door krib en kribvak) niet mogelijk. Door de aanname kan echter de invloed van het kribprofiel op de kribafvoer overschat worden. Om de relevantie hiervan te bekijken wordt het kribaandeel aan de totale ruwheid geschat met een fractie ζ . Met Verg.6.2 kan H_2/H_1 dan in Verg.6.1

$$\text{geschreven worden als } \frac{H_2}{H_1} = 1 - \alpha \frac{L_{\text{kribvak}} i_{\text{rivier}}}{H_1} \approx 1 - \alpha \frac{0,02}{H_1} \text{ met } 0 < \zeta < 1$$

Door dit in te vullen kan voor een variërende waarde van H_1 , voor verschillende dwarsprofielen, de afvoer over de kribben worden geschat. Ter illustratie van het effect van ζ het volgende rekenvoorbeeld. Bij een snelheid van ongeveer 0,5 m/s, een diepte in het kribvak van ongeveer 4 m en een Chézy waarde van 40 m^{1/2}/s zou bij evenwichtsstroming een verhang van 0,008 m per 200 m optreden. In dat geval zou ζ worden geschat met $(0,02-0,008)/0,02=0,6$. Als de kribafvoer met Verg.6.1 en 6.2 zou worden uitgerekend, dan zou de kribafvoer bij $\zeta=0,6$ met 20% verminderen ten opzichte van de afvoer met $\zeta=1,0$. In het vervolg wordt gerekend met $\zeta=0,8$ voor alle waterdiepten.

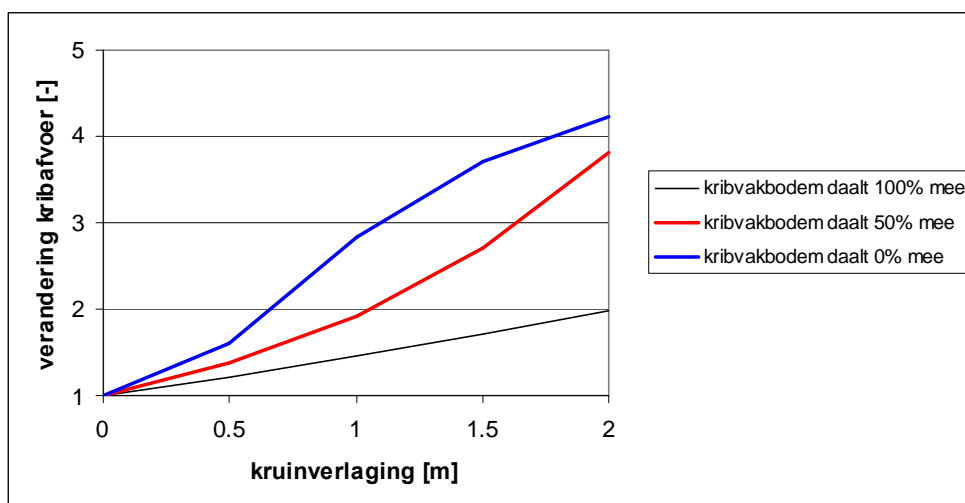
6.3 Invloed van het dwarsprofiel

Met Verg.6.1 en 6.2 kan een indicatie worden gegeven van het effect van het dwarsprofiel op de grootte van de kribafvoer. Als referentie profiel (met bijbehorende referentie afvoer q_r) wordt gebruikt: een kruinbreedte 2,5 m; een bovenstrooms talud 1:3; een benedenstrooms talud 1:3 en een hoogteverschil tussen kruin en benedenstrooms maaiveld van 1,5 m. Dit leidt tot een kribafvoer zoals weergegeven in Fig.6.2



Figuur 6.2 Kribafvoer bij referentie dwarsprofiel volgens Verg.6.1 ($\zeta = 0,8$).

Bij het verlagen van de kruin speelt zowel de grotere waarde van H_1 , als een mogelijke afname in het hoogteverschil tussen kribkruin en benedenstrooms maaiveld (kribvakbodem). In Fig.6.2 is voor verschillende waarden van dit hoogteverschil de met Verg.6.1 berekende afvoer verandering uitgezet. Om het effect van het kadeprofiel te bekijken wordt het verloop van Fig.6.2 als referentie gebruikt.

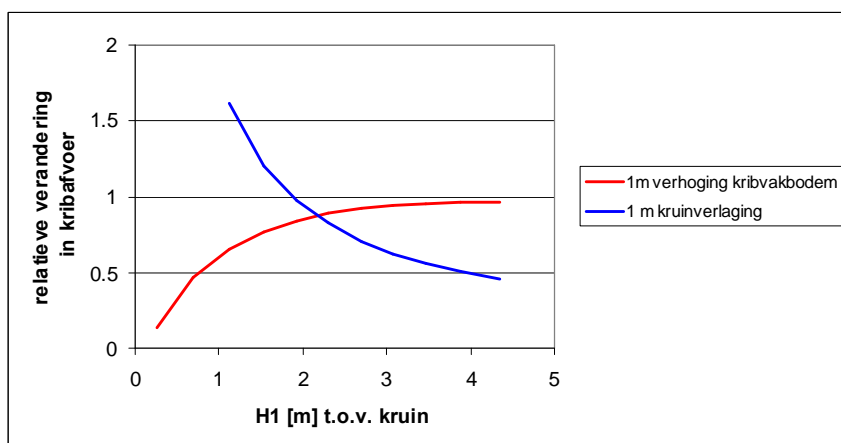


Figuur 6.3 Toename in kribafvoer bij hoge waterstand volgens Verg.6.1.

Als deze toename in kribafvoer in Bijlage B (Verg.B.7-b) wordt ingevuld, dan kan de verwachte verandering in bodemhelling worden bepaald.

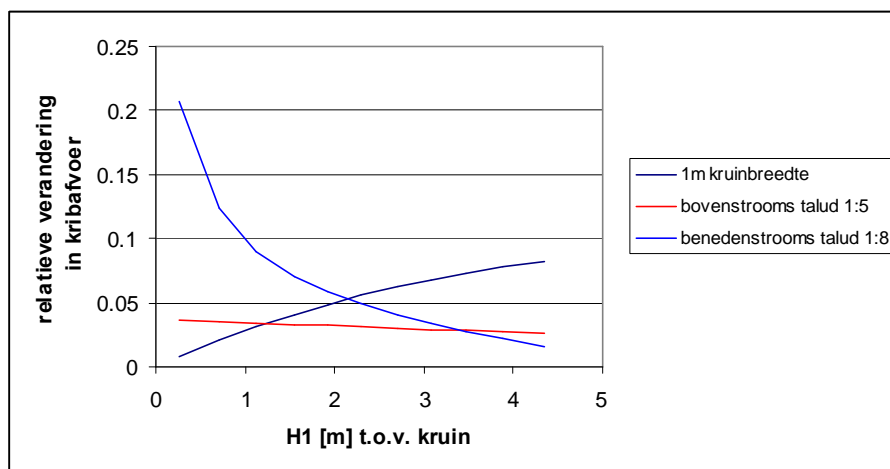
Voor een verlaging van de kruinhoogte met 0,5 m, varieert de toename in kribafvoer volgens Ver.5.1 voor de hogere waterstanden tussen 20 % (bij een evenredig verlaagde kribvakbodem) en 60% (voor een onveranderde kribvakbodem). De invloed van de kribvakbodem is hiermee in dezelfde grootte-orde als de invloed van de kruinverlaging. Veronderstel voor de eenvoud dat de kribvakbodem door de kruinverlaging eveneens daalt met circa 50% van de grootte van de kruinverlaging. In Fig.6.3 is vervolgens het effect van de volgende veranderingen bekeken:

- i) een kleinere kruinbreedte van 2,5 m naar 1,0 m
- ii) een flauwer bovenstrooms talud van 1:3 naar 1:5
- iii) een flauwer benedenstrooms talud van 1:3 naar 1:8
- iv) een 1 m hogere kribvakbodem (hoogteverschil tussen kruin en bodem van 0,5 m i.p.v. 1,5 m)
- v) een verlaging van de kribkruin met 1 m



Figuur 6.4-a Effect van kruinhoogte en kribvakbodem op de kribafvoer.

Volgens Verg.6.1 leiden veranderingen in kruinhoogte en kribvakbodem tot de grootste verandering in kribafvoer. Het is opvallend dat de verandering in kruinhoogte vooral effectief is voor lagere waterstanden t.o.v. de kruin, terwijl een hogere kribvakbodem vooral effectief is voor hogere waterstanden. Een *kleinere kruinbreedte* (kortere overlaat) leidt met name voor situaties met hogere waterstanden tot een toename in kribafvoer. De absolute waarde van deze afvoerandering is echter niet groot (orde 8%). Een *flauwer bovenstrooms talud* leidt tot ongeveer 3% meer kribafvoer voor alle afvoeren. Tenslotte een flauwer benedenstrooms talud. Uit Fig.6.4 blijkt dat dit volgens Verg.6.1 leidt tot een relatief grote toename in kribafvoer (20%) voor waterstanden t.o.v. de kruin tot 1 m. Voor grotere waterstanden neemt het effect af (tot circa 2%).



Figuur 6.4-b Effect van profielveranderingen op de kribafvoer.

6.4 Conclusies

Met uitzondering van het bovenstrooms talud, dat volgens Verg.6.1 voor alle waterstanden een constante invloed lijkt te hebben, is de invloed van veranderingen in de kribparameters sterk afhankelijk van de waterstand. Voor waterstanden van minder dan 2 m op de krib zijn vooral de kruinhoogte en het benedenstrooms talud effectief. Voor grotere waterstanden lijken vooral de kribvakbodem en de kruinbreedte van belang. Als Verg.6.1 een correct beeld geeft, dan is hiermee vanuit het gewenste functioneel ontwerp uit te werken in een ruimtelijk ontwerp. Ter illustratie hiervan het volgende voorbeeld, met de huidige kribdimensies als uitgangspunt.

Als een functioneel kribontwerp is gericht op een toename van de kribafvoer bij met name de “lagere” hoogwaters (bv. in de BovenWaal), dan lijken verlagen de kribkruin en/of in mindere mate een flauwer

benedenstrooms talud het meest effectief. Als echter alleen onder maatgevende condities gestreefd moet worden naar een grotere kribafvoer, dan kan gedacht worden aan het verhogen van de kribvakbodem (t.o.v. de kribkruin) en/of in mindere mate een kleinere kruinbreedte.

Als daarentegen een functioneel kribontwerp is gericht op een grotere concentratie van stroming in de hoofdgeul bij "lagere" hoogwaters en een toename in afvoercapaciteit voor maatgevende rivierafvoeren (bv. Midden- en BenedenWaal), dan kan dit volgens Verg.6.1 leiden tot twee principe-ontwerpen

- a) een constante kruinhoogte dito kribvakbodem en een veranderd dwarsprofiel met een
 - a1) een steiler bovenstrooms talud in combinatie met een kleinere kruinbreedte
 - a2) een steiler benedenstrooms talud *) met een flauwer bovenstrooms talud
 - a3) een steiler benedenstrooms talud *) met een kleinere kruinbreedte
- b) een constant dwarsprofiel met een verhoogde kruinhoogte en een onevenredig verhoogde kribvakbodem

Een derde mogelijkheid is natuurlijk een combinatie van beiden.

*) Omdat tijdens hoogwater in veel gevallen sedimentatie op het benedenstrooms talud optreedt (Fig.6.1) lijken de opties a2) en a3) niet zo duurzaam.

De belangrijkste conclusies kunnen als volgt worden samengevat.

- De afvoerregulering van kribben kan worden geoptimaliseerd met het dwarsprofiel en het hoogteverschil tussen kribkruin en kribvakbodem
- Met Veg.6.1 wordt geschat dat een verlaging van de kribkruin met 1 m kan leiden tot een toename in kribafvoer met een factor 1,5 á 3 (2 m verlaging kan leiden tot een afvoertoe name met een factor 2 á 4). Het niveau van de kribvakbodem is van groot belang voor de grootte van de kribafvoer.
- Bij lokale veranderingen in het kribprofiel mag verondersteld worden dat de relatieve verandering in afvoer (zoals bijvoorbeeld weergegeven in Fig.6.5) gelijk is aan de relatieve verandering in stroomsnelheid over de kribvakken en oeverzone. Dit betekent dat met vorm van de kribben ook de risico's op oevererosie en de snelheid van sedimentatie op de oevers kan worden beïnvloed.

Hoofdstuk 7 Morfodynamiek van oevers

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt gezocht naar functie-eisen van kribben ten aanzien van zowel oeverbescherming als de bijdrage aan de afvoer van sediment in een riviertak (sedimenthuishouding). De sedimenthuishouding van kribvakken is van belang voor de morfologische ontwikkeling van het zomerbed en van het winterbed. Er is een groeiende belangstelling voor een grotere inzet van kribvakken in het rivierbeheer, als instrument om de sedimentbalans te optimaliseren. De rol van oevers in herinrichtingplannen, als morfodynamische zone tussen land en water is hoog gewaardeerd; in veel plannen wordt geprobeerd de interactie tussen uiterwaard en oeverzone van de hoofdgeul te versterken.

Bij erosie van oevers is er sprake van een cyclus van destabilisatie van de oever en afvoer van het erosieproduct. Vermindering van een van beide processen leidt tot vermindering van oevererosie. Als factoren voor oever-destabilisatie noemt Petersen (1986), (refererend aan het US Army Corps of Engineers) met name veranderingen in;

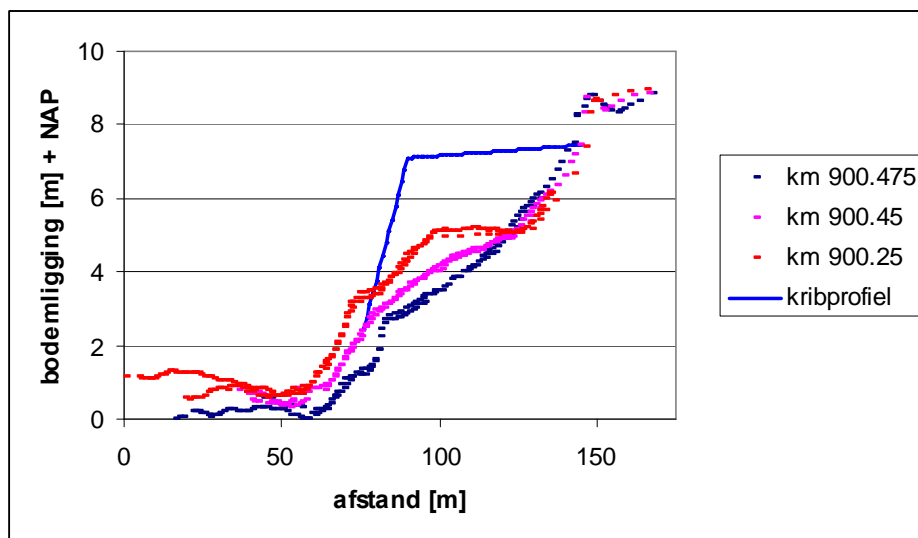
- stabiliteit bodemoppervlak :
 - a) door erosie bij de teen van de oever (stroming), erosie bij de oeverlijn (golven en stroming) en erosie boven de oeverlijn (stroming tijdens hoge afvoeren)
 - b) bij droogtescheuren gevolgd door overstroming
 - c) door overbelasting op de oever (gewicht vegetatie)
- vochtgehalte binnen de oever
 - a) door verzadiging na overstroming
 - b) met als gevolg erosie door piping

Daarnaast worden lokatie-afhankelijke condities genoemd (geomorfologie, vergravingen, etc.). Voor het karakteristiek gedrag van oevererosie onderscheidt Petersen (1986) vervolgens cohesieve, niet-cohesieve en gelaagde oevers. De rol van kribben op oeverdestabilisatie is indirect; de waterbeweging (stationaire neer en door scheepvaart opgewekte golven) in kribvakken is afhankelijk van de vorm van het kribvak en de doorlatendheid van de krib. De afvoer van het erosieproduct is alluviaal; een neer kan het sediment uit het kribvak "werpen" en/of eolisch; bij voldoende aangrijping van de wind kan materiaal uit het kribvak worden geblazen.



Figuur 7.1 Afslag van gelaagde oever (na hoogwater).

De hydraulische belasting op oevers wordt veroorzaakt door stroming en golven die, afhankelijk van de waterstand, kunnen aangrijpen op verschillende hoogten. Voor situaties met gemiddelde afvoer is de belasting door waterbewegingen ten gevolge van het grote aantal scheepspassages (primaire en secundaire golven en schroefstraal) van groot belang. Hoewel een directe relatie niet is aangetoond, noemen Verheij en Huiskens (1993) scheepvaarteffecten (hogere vaarsnelheden en grotere schepen) als belangrijkste oorzaak voor de toename in oevererosie van de IJssel die de aanleiding gaf tot de grootschalige verstening na 1970.



Figuur 7.2 Voorbeeld van kribvakbodem (MiddenWaal).

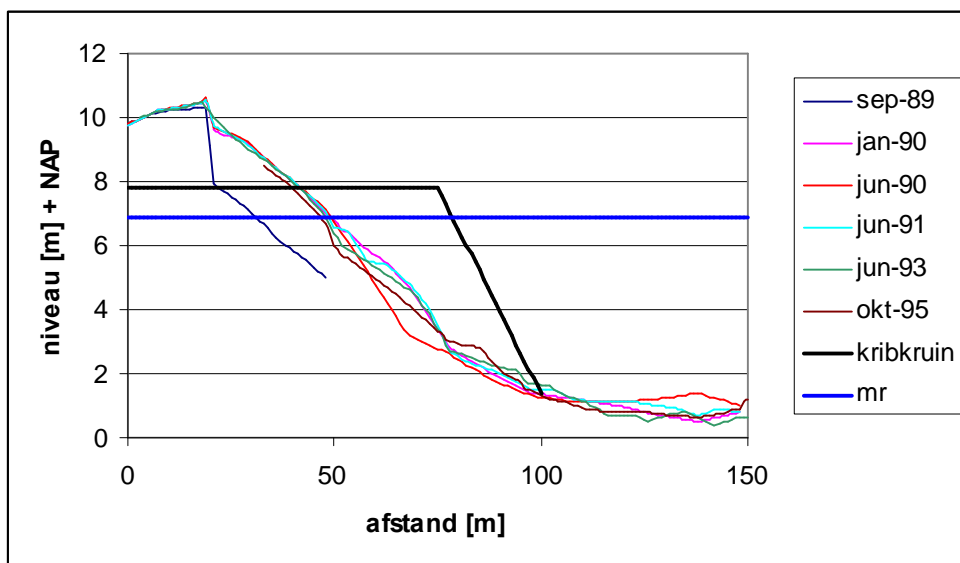
In Fig.7.3 (Van Hal, 2002) is een voorbeeld gegeven van een typische kribvakbodem (bij Waal km 900, rechteroever). De kribvakbodem ligt als een klein plateau tussen een steile overgang naar de hoofdgeul ter hoogte van de kribkoppen, en een steilere oeverzone rondom de gemiddelde waterstand.

Volgens Verhoeven (2001) lijkt de achterloopsheid van kribben langs de Waal de laatste jaren toe te nemen. De rol van kribben hierin betreft de invloed op de waterbeweging in een kribvak en de aansluiting tussen constructie en uiterwaard. Dit kan als volgt worden toegelicht. Naast waterbewegingen door secundaire golven, veroorzaken primaire golven van een passerend schip een waterstandsverandering van circa 0,2 m in het kribvak. Bij een ondoorlatende krib bouwen deze waterstandsveranderingen een extra verval op over de krib. Dit versterkt stroming bij de kribkop, (bij overstroomde kribben) over de kruin of bij de kribwortel. Deze stroming kan ontgronden en achterloopsheid inleiden.

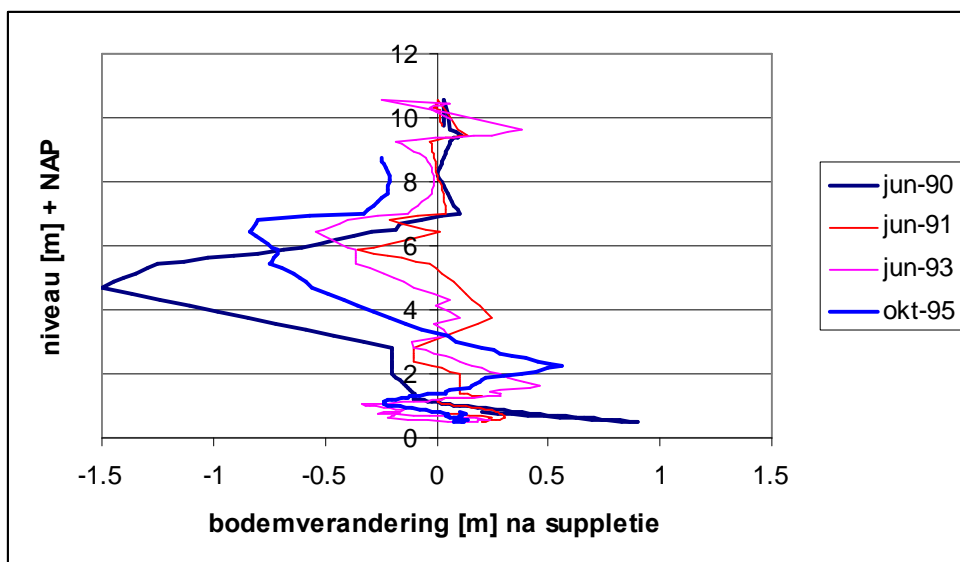
7.2 Huidige situatie

Ten aanzien van oevererosie in kribvakken is er geen voorspel-instrument beschikbaar; hier worden enkele relevante waarnemingen samengevat. In Duijn (1996) wordt gerapporteerd over de oevererosie in kribvakken langs de Waal nabij Ewijk, na suppletie van zand over het gehele kribvak profiel. Een voorbeeld van waarnemingen langs een representatief profiel in kribvak 892,720/892,900 is weergegeven in de volgende figuren. In Fig.7.3-a is de gemeten bodemhoogte vóór en ná suppletie weergegeven, samen met de contouren van de nabijgelegen krib en de gemiddelde lokale waterstand (M.R.).

De suppletie in het kribvak leidde tot circa 2 m bodemverhoging. Uit de bodemveranderingen ná suppletie (Fig.7.3-b) blijkt dat de grootste veranderingen (na één jaar) plaatsvinden in een 3 m zone onder de gemiddelde rivierwaterstand (tussen M.R. en M.R. -3 m). Daarna vindt ook erosie plaats boven M.R. met als gevolg een verplaatsing van de oeverlijn. Het geërodeerd volume verplaatst zich richting hoofdgeul, waardoor de zone onder m.r. in de periode van twee á drie jaar na de suppletie tijdelijk weer sedimenteert.. In de laatste meting (vijf jaar na de suppletie) is te zien dat uiteindelijk het gehele kribvakprofiel boven M.R. - 3,0 m erodeert.. De snelste erosie van het suppletie volume treedt op in de zone rond de gemiddelde rivierwaterstand.



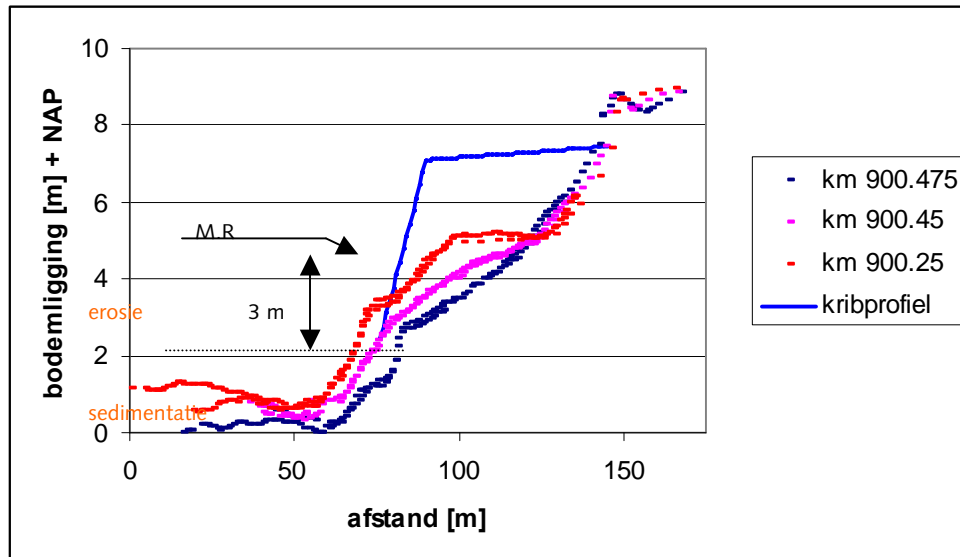
Figuur 7.3-a Gemeten bodemhoogte voor en na suppletie (Duijn, 1996)



Figuur 7.3-b Gemeten bodemveranderingen na suppletie (Duijn, 1996)

De belangrijkste waarnemingen kunnen hier als volgt worden samengevat.;

- na suppletie (met grover sediment dan het oorspronkelijk kribvakmateriaal) vindt erosie plaats in een zone boven M.R.- 3 m (M.R. is de gemiddelde rivierwaterstand). De horizontale snelheid van oeverlijnerosie is in de orde van 1 m/jaar
- de grootste erosie vindt plaats in de zone M.R. \pm 1,0 m
- de relatief snelle erosie in de zone boven M.R.-3 m direct na de suppletie leidt vervolgens ook tot erosie in de zone boven M.R. De verplaatsing van dit erosievolume zorgt voor een *tijdelijke* sedimentatie in de erosiezone tussen M.R. en M.R.- 3 m.
- In de zone tot 2,5 m onder de gemiddelde waterstand (binnen de normaallijnen) vindt alleen sedimentatie plaats; het geërodeerde materiaal plant zich voort als een bodemgolf (tijdelijke onderwaterberm) in het dwarsprofiel in de richting van de hoofdgeul
- de grootte van de sedimentuitwisseling tussen kribvak en hoofdgeul is in Duijn (1996) niet gekwantificeerd, hier wordt geschat (erosie-hoogte x erosie lengte x erosiesnelheid) een jaarlijks volume van $2 \times 50 \times 1 = 100 \text{ m}^3/\text{jaar}$ per kribvak



Figuur 7.3-c Schets van verwachte bodemverandering na suppletie.

Volgens Van Splunder en Leeman (1997) vinden de grootste bodemveranderingen plaats aan de stroomopwaartse zijde van het kribvak. In de ondiepe kribvakken in de binnenbocht is begroeiing beperkt, kan sprake van een grote morfodynamiek (sedimentatie) en verplaatst de lokatie met golfaanval zich afhankelijk van de rivierstand over een grotere breedte. In kribvakken in de buitenbocht zijn veranderingen (oevererosie) veel kleiner, is de invloed van begroeiing groter, en grijpt de golfaanval die door scheepvaart wordt veroorzaakt op een kleinere breedte aan.

Grofweg kan worden aangenomen dat de vegetatielijn (de markering tussen het begroeide en onbegroeide deel van de oever) overeenkomt met het waterstandsniveau dat gemiddeld 100 á 150 dagen per jaar wordt overschreden ($Q_{waal} = 1300 \text{ á } 1600 \text{ m}^3/\text{s}$). Dit niveau van de vegetatielijn ligt gemiddeld circa 0,7 á 1,5 m onder de huidige kribkruinhoogte.

Aanvullende informatie levert de monitoring van de verwijdering van de oeververdediging bij het Engelse Werk (Simons *et al.* 2001). In 1995 werd tussen km-raai 978.920 en 979.620 een gestrekte, stenen oeverbelijning verwijderd, en werden kribben aangelegd zonder de normaalbreedte te veranderen (de kribben zijn landinwaarts aangelegd). Drie jaar naar aanleg is, ongeveer ter hoogte van de gemiddelde waterstand, circa 3 m (horizontale) oevererosie waargenomen, met name door scheepvaartgolven. De oeverafslag tussen de kribben treedt op in de vorm van een steilrand vanwege de gelaagdheid van de oever (zand afgedekt met een kleilaag).

Voor een functioneel ontwerp van een oeverbescherming op basis van de situatie bij gemiddelde afvoer is er behalve een onderscheid in binnenbocht; buitenbocht, rechtstand en linkeroever of rechteroever (Van Splunder en Leemans (1997)) geen aanleiding om kribben lokaal te optimaliseren. Volgens Witteveen en Bos (1999) zijn steilranden vooral te vinden langs de Boven- en Middenwaal. Lokale condities (en dus lokale optima) spelen wel een rol als het gaat om oevererosie tijdens hoogwater. Voor de stabiliteit van oevers tijdens hoogwater wordt het ruimtelijk stroombeeld van uiterwaard en hoofdgeul van belang. Voor een ruimteschaal in de orde van 20 á 50 m, kan de grootte en richting van stroomsnelheden over een oeverzone worden afgeleid van met WAQUA (numeriek model voor twee-dimensionale, dieptegemiddelde waterbeweging) berekende snelheden tijdens een representatief hoogwater. De numerieke analyse in WL (1994) duidt erop dat

- in een zone van circa 50 m tussen hoofdgeul en uiterwaard, de stroomsnelheden bij een Waalafvoer van $5420 \text{ m}^3/\text{s}$ kunnen variëren tussen 1,5 en 0,8 m/s.
- ter plekke van instroming richting uiterwaard (bv. ter plekke van plassen (geulen) of winterbedverbreding), en uitstroming richting hoofdgeul (bv. ter plekke van schaar dijken, benedenstrooms aangetakte strangen of stroombelemmerende hoogwatervrije terreinen), stroming met hoge stroomsnelheden geconcentreerd over de oeverzone stroomt

Door zowel beperkte modelconcepten (WL, 1990) als door onbekende ruimtelijke variaties in aanval en sterkte, is oevererosie vooralsnog een moeilijk generiek te voorspellen proces. Voor wat betreft het dimensioneren van oeverbescherming langs de hoofdgeul, is wellicht het maken en gebruiken van een "risico"-kaart haalbaar. Thorne (1990) noemt voor potentiële oevererosie drie categorieën parameters relevant;

- a) oever (geometrie (hoogte tov gemiddelde waterstand, helling en vorm) en grondsoort (cohesiviteit, gelaagdheid, begroeibaarheid (*fertility*)))
- b) rivier (hydraulische parameters (lokale snelheden, turbulentie en wervelintensiteit, waterdiepte variaties, golfhoogte) en morfologie (dwarsprofiel, kromming, sedimenttransport, lange termijn bodemontwikkeling))
- c) vegetatie (type, dichtheid, positie op de oever, diversiteit, leeftijd, gezondheid, hoogte, kroonoppervlak)

Wellicht kan uit een dergelijke indeling een aantal *discriminerende* parameters worden geselecteerd en vergeleken met waarnemingen (o.a. van de Dienstkring). Als er een correlatie wordt gevonden, kan de waarde van de relevante parameter op een kaart worden geplot. Met een dergelijk overzicht van risicovolle lokaties langs de rivier kan voor elke lokatie een optimale oeverbescherming worden ontworpen, bijvoorbeeld op basis van de beschikbare ruimte en met de inrichtingseisen uit Rijkswaterstaat (1993) als leidraad.

7.3 Kribvakken en de sedimenthuishouding

De rol van kribvakken in de sedimenthuishouding van de rivieren is niet helemaal bekend. Desondanks lijkt er (Witteveen en Bos, 1999) een groeiende behoefte te zijn aan kennis over

- kribvakken als bergingsmogelijkheid voor gebaggerd sediment
- oeverstabilisatie door kribvaksuppletie
- stabilisatie en bescherming van oevervegetatie door kribvaksuppletie
- golfdemping door kribvaksuppletie
- kribvakken als sedimentbron voor een degraderend zomerbed/ rivierduinen in de uiterwaard

Naast de analyse van oever-suppletie in Duijn (1996), kunnen de kribvakmetingen zoals gerapporteerd in Ten Brinke (2002) worden genoemd. Een voorbeeld van een theoretische gedragsanalyse van de kribvakmorfodynamica is beschreven in Sieben en Douben (2000), waarin veranderingen in kribvakbodem gekarakteriseerd worden met een kribvak*tijdschaal* en een *evenwichtsbodem*. Voor de *tijdschaal* wordt gesteld dat deze afhankelijk is van de uitwisselingssnelheid tussen hoofdgeul en kribvak, de "scheepvaartgemiddelde" waterbeweging in het kribvak; de korrelvalsnelheid, de waterdiepte en het sedimenttransport in de hoofdgeul. Voor de *evenwichtswaarde* van de kribvakbodem wordt naast een aantal coëfficiënten voor sedimenttransport en waterbeweging, de gemiddelde waterdiepte in de hoofdgeul genoemd. Voor details wordt verwezen naar Sieben en Douben (2000).

Voor wat betreft de morfologische interactie tussen kribvak en hoofdgeul zijn twee vormen denkbaar;

1. een *vrije* interactie die bijvoorbeeld wordt gedreven door (tijdelijke) afwijkingen van lokale evenwichtsbodemliggingen (zowel in kribvak als hoofdgeul).
2. een *gedwongen* interactie door bijvoorbeeld een combinatie van baggeren in de hoofdgeul en storten in de oeverzone

ad 1) vrije interactie

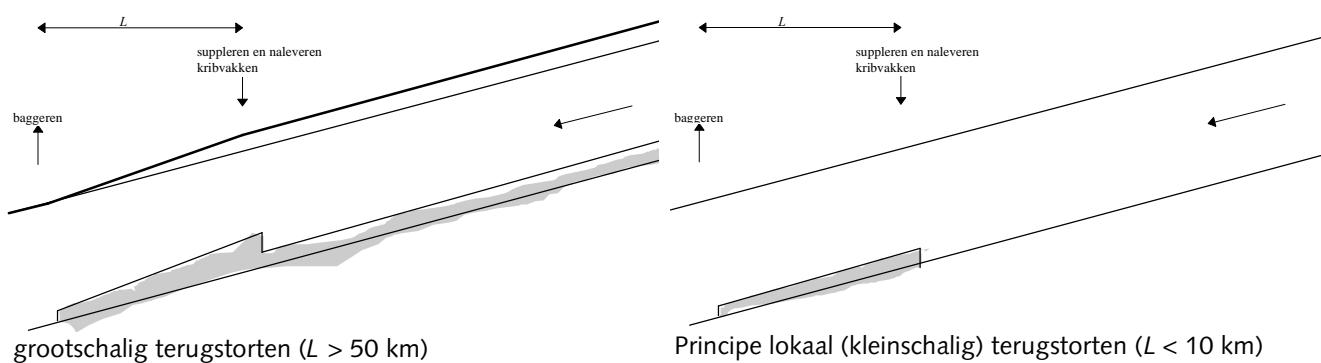
Met betrekking tot het eerste is er een indicatie dat door interactie met kribvakken, de bodemveranderingen in de hoofdgeul *sneller gedempt* worden, en bovendien iets *langzamer voortplanten*. Deze interactie lijkt de kortere bodemgolven in de hoofdgeul te onderdrukken. Een belangrijke parameter hierin is de verhouding tussen de effectieve kriblengte en de normaalbreedte. Voor grootschalige bodemveranderingen (bv. de lange termijn Waalbodemontwikkeling) lijken hoofdgeul- en kribvakbodem te zijn gekoppeld (vergelijk de trends in terugschrijdende oeverlijnen en bodemdaling in Fig.3.9).

Een voorbeeld is het *lokaal* baggeren (knelpuntbaggeren) in de hoofdgeul in combinatie met een lokale stort in de kribvakken. Door het "meeademen" van kribvakken kan het lokaal verlaagde zomerbed sneller worden gevuld. Als de baggerspecie in het morfologisch actieve deel van het kribvak wordt gestort, zal de storting

met vertraging (volgens bovengenoemde kribvaktijdschaal) aan de hoofdgeul teruggeleverd worden totdat de evenwichtswaarde van de kribvakbodem is bereikt.

ad 2) gedwongen interactie

Met een beheer van continu baggeren in de hoofdgeul en continu storten in de kribvakken wordt een retourstroom opgewekt van kribvak naar hoofdgeul. Voor de grootte hiervan speelt de genoemde tijdschaal een rol. Als bovendien gebaggerd materiaal in bovenstroomse kribvakken wordt gestort, is lokaal sprake van een verhoging van sedimenttransport. Dit levert een jaargemiddelde verandering in bodemligging op. Als dit consequent voor alle rivierstukken wordt uitgevoerd levert dit een verandering in evenwichtsbodemligging op (zonder hoogwatereffecten) die is geschetst in de linkerfiguur van Fig.7.4. Als slecht in een enkel rivierstuk baggerspecie bovenstrooms wordt gestort, dan leidt dit tot een lokale verondieping zoals geschetst in de rechterfiguur.



Figuur 7.4 Principe schets jaargemiddeld baggeren en bovenstrooms storten in hoofdgeul.

Ter indicatie kan een schatting gemaakt worden van de relatie tussen de inspanning (het jaarlijks te baggeren, transporteren en storten baggervolume) en effect (verondieping).

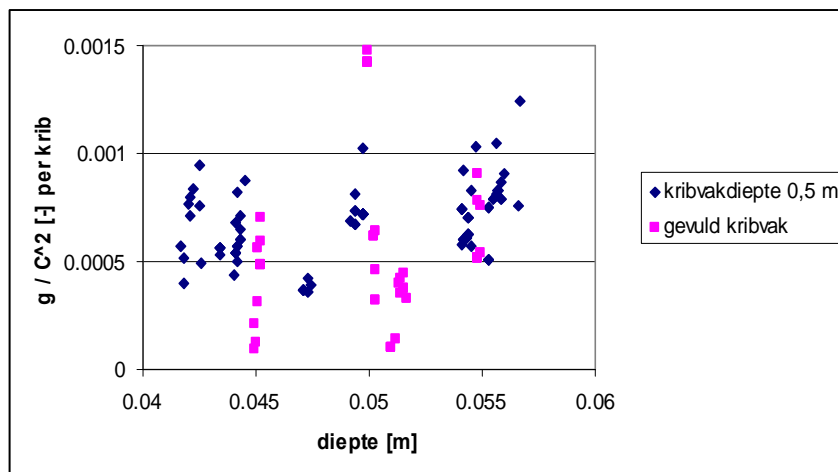
$$\text{Kleinschalig terugstorten: } \frac{a_1}{a_0} = \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{-1/n}$$

$$\text{Grootschalig terugstorten: } \frac{i_1}{i_0} = \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{3/n}$$

Hierin is n de graad van niet-lineariteit in het sedimenttransport met een grootte-orde $n=5$. Geconcludeerd kan worden dat het kleinschalig "rondpompen" van 10% van de jaarlijkse sedimentvracht leidt tot een dieptevermindering van 2% (grootte-orde 0,08 m aanzanding). Het grootschalig "rondpompen" van 10% van de jaarlijkse sedimentvracht leidt tot een vergelijkbare diepte-afname en een toename in bodemverhang met ongeveer 6%. Met de grove schatting van $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ op basis van Duijn (1995) t.o.v. een jaarlijkse sedimentvracht van 500.000 m^3 , is de grootte van het extra transport tot circa 0,04% beperkt. Met de huidige kribvakken lijkt het effect van een grotere sedimentuitwisseling op de waterdiepte en bodemhelling zeer beperkt. Pas als deze uitwisseling een factor 10 á 100 hoger wordt het aantrekkelijk om kribvakken in het rivierbeheer grootschalig in te zetten bij het "rondpompen" van sediment voor het stopzetten van een lange termijn bodemdaling.

Om ongewenste gradiënten in sedimenttransport te beperken, moeten korrelgrootten van gestort en ontvangend materiaal niet te veel afwijken. Dit betekent (zie Fig.3.2-b), in combinatie met het lange termijn effect van de vaste lagen, dat het rondpompen van sediment beperkt zou moeten blijven tot de Midden-Waal (Nijmegen-Tiel) en de Beneden-Waal.

De inzet van kribvakken als naleverende sedimentbron voor de hoofdgeul heeft nog een neveneffect. Door het vullen van het kribvak (met beperkte uitwisseling) neemt de stroomgeleiding tijdens hoogwater (Fig.6.2) en bij gemiddelde afvoer toe. Dit laatste is weergegeven in Fig.7.5 waar bij een gevuld kribvak (aan beide oevers) de totale wrijvingscoëfficiënt ongeveer halveert bij een situatie met gemiddelde afvoer (niet-overstroomde krib). Dit kan leiden tot grotere (en meer uniforme) stroomsnelheden en een grotere waterdiepte in de hoofdgeul (grootte-orde 0,1 m gebaseerd op Tabel 3.2).



Figuur 7.5 Afname “wandwrijving” bij gevulde kribvakken in schaalmodel (WL, 1969).

Tenslotte zou het mogelijk kunnen zijn dat bij een *gevuld* kribvak de door de scheepvaart geïnduceerde waterbewegingen rondom de kribkop minder heftig zijn, met als gevolg minder lokale ontgronding.

7.4 . Conclusies

De rol van kribben in de oeverbescherming; de afvoer van sediment en de herinrichting van uiterwaarden kan als volgt worden samengevat.

De inzet van kribvakken voor een bijdrage aan de grootschalige sedimenthuishouding van de Waal is een belangrijk maar moeilijk te kwantificeren onderdeel van een functioneel kribontwerp. De (te) beperkt beschikbare waarnemingen leiden op het volgende. In principe kunnen kribvakken (en de sedimentuitwisseling met de hoofdgeul) worden ingezet om de grootschalige bodemdaling (Hoofdstuk 2) tijdelijk te beperken. De waarnemingen duiden vooralsnog aan dat met de huidige kribvakken de invloed van de sedimentuitwisseling tussen hoofdgeul en kribvak op de *grootschalige* morfologie zeer beperkt zal zijn.

Na suppletie in de kribvakken bij Ewijk lijkt bij het herstel naar het oorspronkelijke dwarsprofiel vanaf M.R.-2,5 m vooral sprake van erosie, met een horizontale snelheid van 1 á 3 m per jaar. In de zone hieronder is vooral sprake van tijdelijke sedimentatie die zich als bodemgolven voortplant richting de hoofdgeul.

Bij het veranderen van de belijning bij het Engelse Werk vond met name in de zone rondom M.R. oevererosie plaats met een gemiddelde snelheid van ongeveer 1 m per jaar.

Een extra circulatie van sediment, die door een cyclus van “continu” baggeren in de hoofdgeul en storten in bovenstroomse kribvakken in stand wordt gehouden, moet tot een begrensd rivierstuk beperkt blijven (bv benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen, en bovenstrooms van Tiel).

Het (aan)vullen van kribvakken leidt tot een verbetering van de stroomgeleiding. Als hypothese wordt gesteld dat door het ondieper maken van een kribvak de door de scheepvaart opgewekte waterbeweging in het kribvak wordt gedempt. Als hierdoor de snelheidspieken bij de kribkop afnemen zou ook de lokale ontgronding bij kribkoppen minder kunnen worden.

Hoofdstuk 8 Ruimtelijk kribontwerp

8.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 zijn de belangrijkste waterhuishoudkundige functies beschreven. In combinatie met de geïnventariseerde ontwikkelingen in Hoofdstuk 3 leidt dit (op basis van Ariëns *et al.* (1994)) tot het formuleren van de gewenste kribfuncties. De kribfuncties zijn gedefinieerd in Tabel 8.1. Op basis hiervan wordt in dit hoofdstuk een ruimtelijk ontwerp gemaakt. In dit rapport wordt het aantal varianten in ruimtelijk ontwerp afgebakend tot kribtypen voor Boven- en MiddenWaal en voor de BenedenWaal (zonder getijde aspecten).

	Rivierfunctie	Uitwerking kribfunctie	schaalniveau
A	afvoer water en ijs	1) instandhouden van hoofdgeul met milde kromming en voldoende breedte en diepte 2) beperken van stromingsweerstand bij hoogwater	tak tak
B	afvoer sediment	1) beperken grootschalige variatie in sediment transport mbv grootschalige laterale uitwisseling 2) beperken kleinschalige variaties in sedimenttransport mbv kleinschalige laterale uitwisseling	tak breedte
C	hoofdtransportas	1) fixeren van de stroomvoerende breedte bij OLR 2) tegengaan van een vlechtende of meanderende rivier door fixatie van de oevers 3) beperken variatie in hoofdgeulafvoer bij hogere waterstanden 4) uniform stroombeeld (minimale verstoring van grootte en richting stroomsnelheden) 5) voldoende zicht van scheepvaart, dus geen hinder van begroeiing op oevers of kribben 6) veilige scheepvaartgeleiding	tak&breedte tak breedte breedte breedte tak&breedte
D	natuur en landschap	1) inrichting naar oeverdoeltype waarbij streefbeeld zoveel mogelijk wordt behaald 2) versterking huidige morfodynamiek 3) gebruik maken van begroeiingsmogelijkheden	tak&breedte breedte breedte
E	onderdeel waterkering	1) voorkomen schade aan de waterkering	breedte

Tabel 8.1 Samenvatting kribfuncties.

De belangrijkste wensen en eisen die verder door Ariëns *et al.* (1994) worden genoemd zijn:

- geen gebruik maken van schadelijke stoffen i.v.m. uitloging
- negatieve invloed van gebruikte materialen op waterkwaliteit voorkomen
- gebruikmaken van gebiedseigen natuurlijke materialen
- zo goed mogelijk voldoen aan rust-, schuil-, foerageer- en eventueel kraamfunctie
- type verdediging moet bestand zijn tegen vandalisme
- oever moet toegankelijk zijn en ingericht voor recreatie en sportvissen
- drinkplaatsen voor vee
- voorkomen aftrappen en vraat door vee d.m.v. het aanbrengen van afrasteringen
- snelle aanleg, beheer en onderhoud

Op basis van de lange termijn ontwikkelingen (Hoofdstuk 3) kan hier aan worden toegevoegd:

- de kribkuinen liggen relatief hoog ten opzichte van de bodemligging
- op BovenWaal en MiddenWaal kan worden gezocht naar een afname in de jaargemiddelde, grootschalige capaciteit van sedimenttransport in de hoofdgeul
- gestrekte oevers zijn vaak aangelegd op lokaties met een hoger oevererosie-risico
- de huidige puntoplegging van de stroming (door middel van gesloten kribben) leidt tot lokaal grote ontgrondingen en lokale verondiepingen ter hoogte van het kribvak

Voor kribverbeteringen gericht op het laatste item wordt verwezen naar het DWW onderzoek "Innovatieve kribben", en de evaluatie in Sieben (2002).

8.2 Ontwerpfilosofie

Zoals in Hoofdstuk 2 is beschreven, functioneren kribben op grofweg drie niveau's, met lengteschalen vergelijkbaar met de riviertak (grootschalig); rivierbreedte (lokaal) en waterdiepte (instantaan). Voor elk van deze niveau's kan een programma van wensen en eisen worden opgesteld, en voor elk niveau kan een optimalisatie plaatsvinden.

In deze studie wordt hiertoe een top-down benadering gevolgd. Er wordt, op basis van de grootschalige morfologie een *riviertakgemiddeld* ruimtelijk kribontwerp bepaald. Dit ontwerp kan vervolgens op lokaal niveau (rivierbreedte niveau) geoptimaliseerd worden. Tenslotte is dan voor het instantane niveau (alles rondom een enkele krib) het uitgangspunt dat kribaanpassingen (kribkoptalud, openheid van de constructie,...) op rivierbreedte- en rivierniveau geen *kribvakgemiddelde* morfologische effecten mogen veroorzaken (anders dan de effecten die volgens het rivierniveau functioneel ontwerp gewenst zijn). Voor dit laatste wordt verwezen naar het DWW-onderzoek "Innovatieve kribben".

8.3 Ruimtelijk ontwerp op rivierniveau

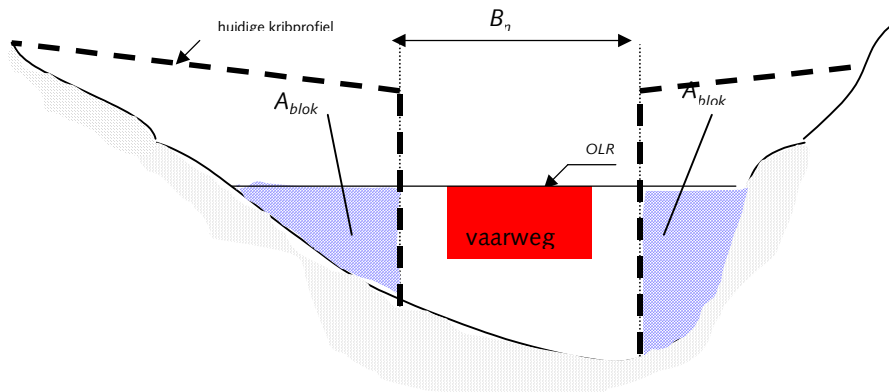
Eerst wordt Tabel 8.1 toegepast voor een algemeen ruimtelijk ontwerp op rivierniveau. Met dit algemeen ontwerp als uitgangspunt wordt getracht op rivierbreedteniveau te optimaliseren. Zoals in Tabel 8.1 is weergegeven zijn op rivierniveau met name de volgende kribfuncties van belang:

	rivierfunctie	kribfunctie	uitwerking kribfunctie
A	afvoer water en ijs	1) instandhouden van hoofdgeul met milde kromming en voldoende breedte en diepte 2) beperken van stromingsweerstand bij hoogwater	1) fixeren oeverlijn door stabilisatie en/of suppletie 2) beperken van hoogteverschil tussen kribkruin en kribvakbodem
B	afvoer sediment	1) beperken grootschalige variatie in sediment transport mbv grootschalige laterale uitwisseling	1) aanpassen van i) capaciteit en ii) aanbod van sedimenttransport aan gewenste bodemontwikkeling
C	hoofdtransportas	1) fixeren van de stroomvoerende breedte bij OLR 2) tegengaan van een vlechtende of meanderende rivier door fixatie van de oevers 6) veilige scheepvaartgeleiding	1) concentreren van stroming bij OLR in hoofdgeul 2) fixeren huidige oeverlijnen 6) kribbakens en zichtbare oeverlijn
D	natuur en landschap	1) inrichting naar oeverdoeltype waarbij streefbeeld zoveel mogelijk wordt behaald	1) zie richtlijnen in RWS (1993)

Tabel 8.2 Kribfuncties rivierniveau

hoofdtransportas

Veronderstel dat de *huidige* rivierloop het uitgangspunt is voor het ruimtelijk ontwerp, en veronderstel dat hiermee aan A1) en C2) wordt voldaan. Uit C1) volgt dat bij OLR de afvoer geconcentreerd moet worden binnen de normaallijnen. Dit legt een minimaal "blokkeringsoppervlak" A_{blok} [m²] vast (Fig.8.1) met a_{blok} [m] een gemiddelde blokkeringshoogte en B_{blok} [m] blokkeringsbreedte als variabelen. Als B_{blok} volgt uit de afstand tussen normaallijn en de oeverlijn bij OLR (Fig.8.1), dan is met $a_{blok} = A_{blok}/B_{blok}$ ook de gemiddelde blokkeringshoogte vastgelegd.



Figuur 8.1 Minimale stroomgeleiding (C1).

Als, in het ruimtelijk ontwerp, de constructie met oppervlak A_{con} [m²] een effectieve porositeit p (doorlatendheid) heeft, dan volgt uit het voorgaande $A_{con} = A_{blok}/(1-p)$. In geval van een open constructie (zoals een palenrij) moet het blokkeringsoppervlak over een groter oppervlak worden verdeeld. Op locaties met frequente knelpunten in de vaarbaanbreedte (zie bv. Douben, 1995), ligt een open constructie daarom niet voor de hand. Op rivierstukken waar geen knelpunten optreden, is in principe de ruimte tussen vaargeul en normaallijn beschikbaar voor kribverlenging. Uitgangspunt hierbij is dat de nautische veiligheid door langere (open) kribben niet mag verminderen. Het blokkeringsoppervlak uit Fig.8.1 voldoet echter nog niet

aan de andere eisen van Tabel 8.2. Het ruimtelijk ontwerp wordt daarom vervolgd met de andere functie-eisen van Tabel 8.2.

oeverbescherming

In A1) is ook het stabiliseren van oevers begrepen. Veronderstel dat oevertafslag door golven (scheepvaart) kan plaatsvinden in de zone vanaf M.R. -2,5 m tot M.R. \pm 1,0 m. Dit betekent dat als oevers beschermd moeten worden, een verdediging tot bij benadering OLR + 2,7 m (Nijmegen en Tiel) en OLR + 2,2 m (Zaltbommel) nodig is. Een stabilisering van de oever kan op verschillende manieren;

- i) het direct stabiliseren van het oevertalud zonder veranderingen in het blokkeringsoppervlak (een stenen kribvakoever). Dit komt niet tegemoet aan de streefbeeld en in Rijkswaterstaat (1993).
- ii) door verhoging van het blokkeringsoppervlak (Fig.8.1) tot een niveau van M.R. + 1,0 m, met als doel om tijdens hoogwater de stroomsnelheden bij/over de oever te reduceren
- iii) oeversuppletie

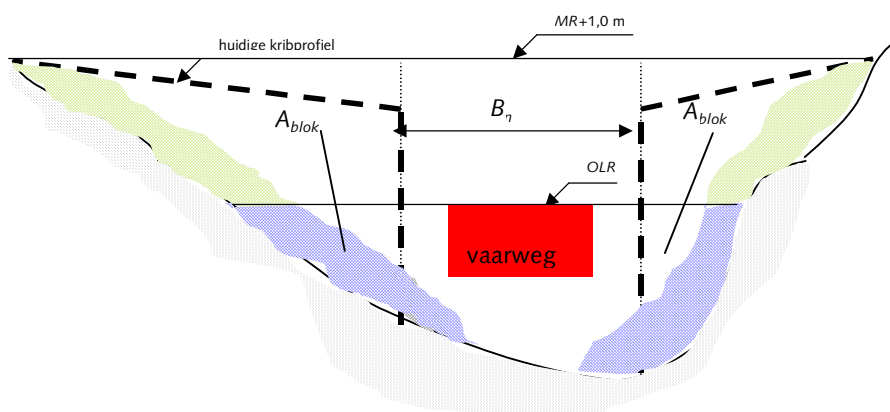
Een uitgangspunt is om huidige Waaloevers met gestrekte belijning onveranderd te laten (optie i). Voor het ruimtelijk ontwerp op riviertakniveau voor de bekripte oevers kan optie ii) gevolgd (Fig.8.2-a); bij een optimalisatie op rivierbreedte niveau kan voor een combinatie van optie ii) en iii) worden gekozen. Praktisch gesproken betekent dit dat om (meer) oevertafslag te voorkomen, het huidige niveau van de kribwortels (ongeveer overeenkomend met M.R.+1,0 m) gehandhaafd blijft.

afvoercapaciteit

Uit A2) volgt voor een gesloten constructie ($p=0$), en in beperkter mate voor een open constructie ($0 < p < 1$) dat beperking van opstuwing bereikt kan worden door een minimaal hoogteverschil tussen constructie en benedenstrooms maaiveld. Hieraan kan worden toegevoegd dat plotselinge verdiepingen en verwijdingen benedenstrooms van de constructie moeten worden beperkt. Dit ontwerp principe leidt tot twee (*extreme*) karakteristieke oplossingsrichtingen

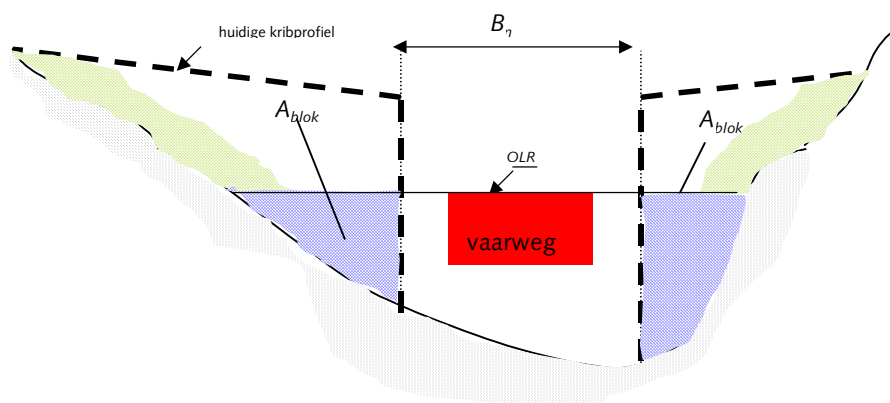
- i) het zoveel mogelijk aanpassen van de kruinhoogte aan het verloop in bodemligging tussen normaallijn en oeverlijn
- ii) het zoveel mogelijk aanpassen van de bodemligging aan het verloop in kruinhoogte (kribvaksuppletie)

Beide opties vergen kennis van de evenwichtbodemligging in een kribvak. Voor het ruimtelijk ontwerp op riviertakniveau wordt gekozen voor optie i); een eventuele combinatie met optie ii) kan op rivierbreedteniveau worden uitgewerkt. (bv. suppletie in combinatie met oeverlijn fixatie (A1, C2) en sedimentberging (B1)) Als naar een minimaal hoogteverschil tussen kruin en bodemligging wordt gestreefd, dan krijgt het blokkeringsoppervlak een vorm zoals geschetst in Fig.8.2-a



Figuur 8.2-a Blokkering bij OLR (C1), stabilizatie van de oever (A1) en minimaal hoogteverschil (A2).

Nb, om het blokkeringsoppervlak onder OLR constant te houden (gelijk aan de schets in Fig.8.1) wordt het binnen de normaallijnen uitgesmeerd. Ter illustratie, de hoogte van het blokkeringsoppervlak in Fig.8.2-a is minstens 1,0 m om (bij een kribhelling van 1:7) de kribverlenging tot 25 m te beperken. Dit zou een *maximale* verlaging van ongeveer 5 m betekenen. Deze optie is echter pas reëel als er inderdaad ruimte is voor constructies binnen de huidige normaallijnen. Als er in het geheel geen verlenging van kribben mogelijk lijkt, dan is het ruimtelijk ontwerp zoals weergegeven in Fig.8.2-b.



Figuur 8.2-b Blokkering bij OLR (C1), stabilisatie van de oever (A1); minimaal hoogteverschil (A2) *buiten* de huidige normaallijnen.

Er zijn echter nog andere criteria in het spel (bebakening voor de scheepvaart (C6) en afvoer van sediment (B1) zie vervolg).

afvoer sediment

Voor een afstemming van het ruimtelijk ontwerp op een optimale transportcapaciteit van de Waal is een onderscheid nodig in Boven- en MiddenWaal (met de lange termijn bodemdaling) en de BenedenWaal (met de lange termijn sedimentatie). Op basis van B1 uit Tabel 8.2 zijn er twee opties voor het ruimtelijk ontwerp;

- lagere* jaargemiddelde sedimenttransport capaciteit in BovenWaal een deel van de MiddenWaal (tot km 910) en een *hogere* jaargemiddelde sedimenttransport capaciteit in de BenedenWaal
- een *hoger* sedimentaanbod vanuit de oeverzone (kribvakken) in Boven- en MiddenWaal en een *lager* sedimentaanbod (of wellicht zelfs een onttrekking van sediment naar de oeverzone) in de BenedenWaal.

Beide aspecten kunnen als volgt worden uitgewerkt.

a) sedimenttransportcapaciteit

De verandering van het jaargemiddelde transportcapaciteit is volgens de analyse in Hoofdstuk 5 afhankelijk van de grootte en duur van de kribafvoer. Deze kan worden beïnvloed met i) de vormgeving van het blokkeringsoppervlak (een kleiner hoogteverschil tussen bodem en kruin veroorzaakt een grotere kribafvoer); ii) uitbreiding van het blokkeringsoppervlak boven OLR en iii) een extra blokkeringsoppervlak binnen de normaallijnen. De beide laatste opties zijn weergegeven in Fig.8.2-b.

Zoals in Hoofdstuk 5 is geconcludeerd, is de grootschalige morfologie niet zo gevoelig voor de mate van verlaging van het blokkeringsoppervlak; twee meter kruinverlaging levert een 2% toename in bodemhelling. Dit lijkt voor de BovenWaal en de MiddenWaal (tot km 910) een goede compensatie voor een deel van de lange termijn bodemdaling. Als, in de MiddenWaal (vanaf km 910) en BenedenWaal de waterdiepte (bij OLR) niet mag verminderen, dan geldt voor het blokkeringsoppervlak grofweg dat een *grootschalige* verlaging met 1 m met slechts 1 m versmalling van de hoofdgeul gecompenseerd zou moeten worden (Bijlage B). Met een dergelijk kleine correctie volstaat een ontwerp zoals weergegeven in Fig.8.2-b.

b) sedimentaanbod

Het tweede, verandering van de sedimentuitwisseling tussen hoofdgeul en oeverzone, zou betekenen dat in Boven- en MiddenWaal de oeverzone (een kribvak) sediment aan de hoofdgeul zou kunnen leveren om bodemdaling te verminderen. Op basis van de waarnemingen in Duijn (1997) zou dit bijvoorbeeld betekenen het suppleren van sediment tussen normaallijn en oeverlijn (waterstandsniveau dat 100 á 150 dagen per jaar wordt overschreden), in de zone tussen M.R. (middelbare rivierwaterstand) en M.R.- 2,5 m.

In de BenedenWaal zou de oeverzone (een kribvak) sediment aan de hoofdgeul moeten onttrekken (kribvakken als zandvang) om sedimentatie te verminderen. In de huidige oeverzone met kribvakken lijkt dit nauwelijks mogelijk; sedimentatie in oeverzones van de Waal tijdens *gemiddelde* condities wordt beperkt door intensieve scheepvaarteffecten. Tijdens hoogwater is wellicht ter plekke van binnenbochten, of ter plekke van stroombanen richting uiterwaard mogelijk. Voor de BenedenWaal kan dit aspect dus slechts op rivierbreedteniveau worden uitgewerkt, waarbij de invloed van door scheepvaart gegenereerde waterbeweging op sedimentatie in de oeverzone van groot belang is voor het ruimtelijk ontwerp.

Vooralsnog wordt, op basis van de grove schattingen van de sedimentuitwisseling tussen kribvak en hoofdgeul in Hoofdstuk 7, de inzet van kribvakken (en kribvaksuppletie) voor rivierbeheer op rivierniveau niet relevant geacht. Dit aspect wordt voor het ruimtelijk ontwerp op *rivierniveau* dus ook niet beschouwd. De potentie van kribvakken voor het lokale beheer (breedteniveau) voor bijvoorbeeld de berging van baggermateriaal, lijkt daarentegen wel relevant.

8.4 Rivierniveaumiddeld kribontwerp

De schetsen in Fig.8.1 en 8.2 op rivierniveau hebben geleid tot een paar principe-varianten van het ruimtelijk kribontwerp;

- 1) blokkeringsoppervlak buiten en binnen de normaallijnen (hierdoor kan een grotere kribafvoer worden toegelaten zonder morfologische effecten)
- 2) blokkeringsoppervlak buiten de normaallijnen
- 3) suppletie in kribvakken (BovenWaal en MiddenWaal)
 - onder OLR t.b.v. vertraagde nalevering aan de hoofdgeul) zonder expliciete oeverbescherming
 - tussen OLR en M.R. + 1 m ten behoeve van oeverbescherming
 - tot M.R. + 1 m t.b.v. oeverbescherming en vertraagde nalevering aan de hoofdgeul

Optie 3 lijkt goed met optie 1 en 2 gecombineerd te kunnen worden en is daarom geen onderscheidende variant in het ruimtelijk ontwerp. Voor de Waal kunnen optie 1 en 2 als volgt worden uitgewerkt. Bij optie 2) zijn doorlatende constructies, of langere kribben uitgesloten (zie ook Sieben, 2002).

In grofweg de BovenWaal en MiddenWaal is sprake van een bodemdaling op langere termijn. Als wordt verondersteld dat deze trend naar de toekomst geëxtrapoleerd kan worden, dan zou verlaging van kribben tot km 910 deze ontwikkeling gedeeltelijk (en wellicht tijdelijk) kunnen compenseren. Voor de MiddenWaal vanaf km 910 en de BenedenWaal kan geen sedimentatie ten gevolge van een kribontwerp toegelaten worden en moet een kribverlaging zonodig gecombineerd worden met een kleine kribverlenging. Dit levert netto overigens nog steeds een grotere afvoercapaciteit bij MHW op vanwege de niet-lineaire invloed van de kruinhoogte (langer en lager).

Samenvattend betekent dit dat de principe-varianten van het ruimtelijk ontwerp, beschreven met een blokkeringsoppervlak, als volgt kunnen worden geformuleerd.

Riviertak	buiten normaallijnen (onveranderde lengte van blokkeringsoppervlak)	buiten en binnen normaallijnen (grotere lengte van blokkeringsoppervlak)
Waal tot km 910		
Waal vanaf km 910		

Figuur 8.3 Principe varianten van rivierniveaumiddeld ruimtelijk kribontwerp.

Het blokkeringsoppervlak is in Fig.8.3 voor de verschillende functies opgedeeld in



Ten opzichte van het huidige blokkeringsoppervlak onder OLR verandert het blauw-gearceerde oppervlak in Fig.8.3 niet. Verder is als uitgangspunt aangenomen dat voor de oeverbescherming (groen-gearceerde oppervlak) een blokkeringsoppervlak tussen OLR en M.R. + 1,0 m van minstens 1 m nodig is. De grootte van het rode oppervlak is, met uitzondering van de figuur rechtsonder, geprojecteerd tussen OLR en M.R. +1,0 m, en dient ter beperking van de grootschalige morfologische effecten (verandering bodemhelling).

Voor de Waal vanaf km 910 lijkt de keuze voor verbetering van het riviertak-gemiddeld ontwerp eenvoudig. Immers als er binnen de normaallijnen geen ruimte is voor kribverlenging dan is verandering eigenlijk niet relevant (linksonder). Als er wel ruimte is voor blokkeringsoppervlak binnen de normaallijnen, dan kan een verbetering worden bereikt (de "kribkopverflauwing" rechtsonder). In dat geval kunnen langere kribben bijdragen tot minder sedimentatie in de BenedenWaal. Door het hoogteverschil tussen kribkruin en bodemligging te verminderen behoeft dit niet te leiden tot opstuwing van waterstanden onder maatgevende condities.

Voor de Waal bovenstrooms van km 910 is er meer ruimte voor verbetering (verlaging). Als er geen blokkeringsoppervlak binnen de normaallijnen wordt toegestaan (vanwege nautische veiligheid en beschikbare ruimte (normaalbreedte minus vaargeulbreedte)), dan lijkt verlaging van *maximaal* 2 m (Tabel 4.3) mogelijk (linksboven). Afhankelijk van de verwachte grootschalige bodemreactie, kan voor een kleinere verlaging worden gekozen. Als het blokkeringsoppervlak ook binnen de normaallijnen geprojecteerd mag worden lijkt een grotere compensatie voor de lange termijn bodemdaling mogelijk.

In deze verkenning zijn alleen grootte-orden gegeven en afmetingen afgebakend. Het is echter onbekend wat een bij veranderde (verlaagde) kribben de bijbehorende evenwichtswaarde van de kribvakbodem zal zijn. Dit levert een onzekerheid op in de uiteindelijke grootte en duur van de kribafvoer, en vervolgens weer op de grootte van het morfologisch effect van de kribverlaging. De vraag welke kribvakbodem is te verwachten moet dus beter beantwoord worden voordat bijvoorbeeld tot grootschalige kribverlaging (in Boven- en MiddenWaal) kan worden overgegaan.

De dimensionering van het ruimtelijk ontwerp kan met behulp van een numeriek model voor de grootschalige morfologie van de Rijntakken nader worden uitgewerkt. De verwachte effecten tijdens en na een hoogwater kunnen bijvoorbeeld met behulp van WAQUA redelijk geïnventariseerd worden. De belangrijkste criteria hiervoor zijn de bodemverandering t.g.v. de kribvormgeving en de diepte bij OLR bij het nieuwe morfologisch evenwicht. Bovendien kan hiermee een indruk worden verkregen van de optimale uitvoeringsstrategie (=de strategie met de minste functiebeperkingen).

8.5 Ruimtelijk ontwerp op rivierbreedte-niveau

Met het in de vorige sectie bepaalde ruimtelijk ontwerp als uitgangspunt, kan vervolgens worden bekeken op welke wijze dit aan lokale condities op rivierbreedteniveau geoptimaliseerd kan worden. Uitgangspunt is dat aan de voor de scheepvaart vereiste bebakenings- en zichtlengte-eisen (C5 en C6) wordt voldaan, en zo mogelijk van begroeiingsmogelijkheden gebruikgemaakt kan worden (D3).

De grootte van het blokkeringsoppervlak in de riviertakgemiddelde principe varianten van Fig.8.3 staat weliswaar vast, net als de riviertakgemiddelde oeverbeschermingshoogte. Echter de verdeling van het rood-gearceerde blokkeringsoppervlak (t.b.v. de sedimenthuishouding) zou over beide oevers kunnen variëren (bv meer in binnenbocht, minder in buitenbocht), om de lokale stroomregulering te verbeteren.

	rivierfunctie	Kribfunctie	uitwerking kribfunctie
B	Afvoer sediment	2) beperken kleinschalige variaties in sedimenttransport	2) hiervoor zijn twee opties te onderscheiden: i) Correctie van stroomsnelheid (grootte- en ruimtelijke verdeling) in de hoofdgeul bij gemiddelde afvoer of tijdens hoogwater ii) Correctie van laterale sedimentuitwisseling
C	hoofd-transportas	3) beperken variatie in hoofdgeulafvoer bij hogere waterstanden 4) uniform stroombeeld (minimale verstoring van grootte en richting stroomsnelheden) 5) voldoende zicht van scheepvaart 6) veilige scheepvaartgeleiding	3) zie B2 4) correctie van variaties in stroomvoerend dwarsprofiel (bv. ter plekke van kribben en in kribvakken) 5) geen hinder van begroeiing op oevers of kribben 6) kribbakens en zichtbare oeverlijn
D	natuur en landschap	2) versterking huidige morfodynamiek 3) gebruik maken van begroeiingsmogelijkheden	2) versterking huidige morfodynamiek 3) gebruik maken van begroeiingsmogelijkheden
E	onderdeel waterkering	1) voorkomen schade aan de waterkering	1) fixatie van oeverlijnen (zie ook A1 in Tabel 8.3)

Tabel 8.4 Samenvatting kribfuncties op rivierbreedte-niveau.

Verondersteld wordt dat de (gemiddelde) lokale bodemstructuren zijn te relateren aan lokale variaties in sedimenttransportcapaciteit (tijdens *gemiddelde* condities) die kunnen worden veroorzaakt door

- veranderingen in afvoer (nevengeulen, achterloopse kribben ?)
- veranderingen in waterstand (getijde invloed)
- afwijkingen tussen kribkop en normaallijn (uitbuigende stroombanen in het kribvak)
- veranderingen in bodemsamenstelling (Fig.3.2-b)
- veranderingen in effectieve stroomvoerende breedte (gestrekte oeverbelijning vs bekripte oevers).

Zonodig kan met een lokale (maximaal 5 km) variatie in het blokkerende oppervlak A_{blok} tussen OLR en MR (dit komt neer op het verlengen of verkorten van een krib) een correctie van lokale stroomsnelheden gecreëerd worden (bv. Taal, 1995) op een wijze dat de *netto* variatie in transportcapaciteit wordt beperkt.

Naast gemiddelde condities is voor het rivierbeheer de situatie tijdens en direct na hoogwater van belang. Zoals in Fig.3.5 is weergegeven, is er langs de Waal tijdens hoogwater sprake van variaties in hoofdgeul afvoer, wat leidt tot tijdelijke en lokale aanzanding en erosie in de hoofdgeul. Door lokaal de *vormgeving* of *grootte* van het blokkeringsoppervlak boven OLR te variëren (rood-gearceerde oppervlak van Fig.8.3), kan de afvoervariatie (C3) voor een deel worden gedempt. Dit is toegepast in Sectie 4.4 . In Hoofdstuk 4 is geschat dat de lokale toename in kribafvoer beperkt zou moeten blijven tot 100%, tenzij dit een niet-uniforme afvoerverdeling in de huidige situatie corrigeert.

Voor wat betreft het versterken van de huidige morfodynamiek in oeverzones kan een lokale optimalisatie gericht zijn op

- i) een afbakening van toelaatbare bodemveranderingen (bv geen erosie binnen 100 m van de bandijk, en maximaal 1 m aanzanding in de oeverzone van de uiterwaard (met een interventieperiode zoals geschat in Sieben (2001c))
- ii) analyse van de huidige morfodynamiek (wat is de lange termijn ontwikkeling van de oever en wat gebeurd er tijdens hoogwater)
- iii) het optimaliseren van het ruimtelijk ontwerp bv.
 - gerichte suppletie onder en boven OLR;
 - "vangende" (inclinante) kribben ter plekke van in- en uitstromend water naar en uit de uiterwaard

Tenslotte kan nog worden genoemd dat door een grotere interactie tussen kribvak en hoofdgeul, de kleinschalige effecten (zoals veranderingen tijdens hoogwater) enigszins kunnen worden onderdrukt (m.a.w. bij een gestrekte belijning langs de gehele oeverlengte van de Waal zou de lokale bodemveranderingen tijdens hoogwater kunnen toenemen).

8.6 Functie eisen innovatief kribontwerp

In de bovenstaande zijn principe-varianten voorgesteld voor een riviertak-gemiddeld ruimtelijk kribontwerp. Met dit nog redelijk generieke ontwerp als uitgangspunt zijn vervolgens een aantal aanbevelingen gedaan voor optimalisatie op rivierbreedte-niveau (op een schaalniveau van kribseries over 5 km oeverlengte). De uiteindelijke vormgeving van bijvoorbeeld kribkop, -lichaam en -wortel vindt echter plaats op basis van de beoogde interactie met het lokale stroombeeld, en de lokale morfologie. Dit laatste schaalniveau is gericht op de lokale (*instantane*) processen rondom een individuele krib. Op dit niveau, waar de krib gedimensioneerd en vormgegeven wordt (sterkte, doorlatendheid, aansluiting met de oever, etc.).

Zowel voor de huidige kribben, als voor de voorgestelde veranderingen (Fig.8.3) in het ruimtelijk ontwerp kan worden gezocht naar een dimensionering die frequente faalmechanismen optimaal tegengaan. Voor deze dimensionering zou moeten gelden dat voor de kribvakgemiddelde effecten de volgende ontwerpcriteria worden gesteld;

- geen verandering in blokkeringsoppervlak tijdens OLR
- een lokale toename in kribafvoer tijdens hoogwater van maximaal 100%
- geen afname in stroomgeleiding voor gemiddelde afvoer
- geen afname in afvoercapaciteit tijdens MHW
- geen ontoelaatbare vermindering van de oeverbescherming (zie ook de criteria in Rijkswaterstaat (1993))
- geen kribben binnen normaallijnen als de vaargeul wordt beperkt

Op basis hiervan zijn oeversecties te selecteren waar aanpassingen van het kribontwerp mogelijk zijn. Bijvoorbeeld:

- geen aanpassing van oevers met gestrekte belijning op minder dan 100 m van de bandijk of zomerkaden
- geen innovatief ontwerp in rivierstukken met oevererosie
- geen suppletievarianten in sedimentatiegebieden (bv BenedenWaal)
- alleen kribconstructies binnen de normaallijnen waar voldoende ruimte is (normaalbreedte minus vaarwegbreedte) en waar de nautische veiligheid niet aangetast wordt

De optimalisering van de krib op instantaan niveau kan voor wat betreft de *rivierkundige* functies (dus ongeacht de beheer- en onderhoudsaspecten zoals geïnventariseerd in WL (1997)) gericht zijn op

- vermindering van de variatie in het stroomvoerend dwarsprofiel (dus vermindering van de uitbuiging in de scheidende stroombaan tussen hoofdgeul en kribvak)
- vermindering van de energiedissipatie (wandwrijving) in het kribvak en bij de kribkop
- vermindering van golfaanval op oevers
- verandering van sedimenttransport uit de kribvakken (een vermindering in geval van oeverbescherming, eventueel een vermeerdering in geval van nalevering van sediment)

Literatuur

- Ariëns, E.E.; J.J. Bakker en J.C.P. Johanson (1994); Functie-eisen, technische eisen en interventieniveaus voor oevers en kribben, FBVO-N-94097, Bouwdienst & DWW.
- Asmerom, K.J.H.K. (2000); Bodemsprongen Pannerdensch Kop en IJsselkop, Afstudeerverslag TU Delft.
- Barneveld, H.J. en E. Mosselman (1993); Oevererosie nevengeulen, WL Delft Hydraulics, Q1674.
- Bouwmeester, J. (1989); Flexibele waterbouwkundige constructies, concept kollege dictaat F4, Vakgroep Waterbouwkunde, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Brinke, W.T.M. ten (1997); De bodemsamenstelling van de Waal en IJssel in de jaren 66, 76, 84 en 95 RIZA nota 97.009.
- Brinke, W.T.M. (2001); Dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemligging en baggergegevens Rijntakken Periode 1900-2000 compleet., cd rom riza.
- Brinke W.T.M. ten (2002); *analyse waterbeweging en bodemligging in kribvak, riza rapport in voorbereiding*
- Cockinga, R.H. (1921); Op welke hoogte behooren de kribben op bovenrivieren te worden aangelegd ?, De Ingenieur, KIVI en VDI No.21.;26 en 27
- Douben, N. (1995); Knelpuntenanalyse Waal, Analyse van scheepvaartknelpunten op de Bovenrijn en Waal; oplossingsrichtingen, RIZA Notanr 95.005
- Duijn, P.P. (1996); Kribvaksuppletie, een goed alternatief ? Evaluatie van een zandsuppletie in drie kribvakken langs de Waal bij Ewijk, W-DWW-96-062.
- Essen, J.A.F. van en J. Sieben (2001); Duinen in de bocht, WSR memo 2001-016.
- Hal, L.W.J. van (2002); persoonlijke communicatie.
- Rijkswaterstaat (1993); Overture. Inrichtingsplan oevers Rijntakken. Hoofdrapport GLD 93/05-01, RWS Directie Gelderland
- Rijkswaterstaat (1991); Waal Hoofdtransportas Rivierkundige maatregelen, RIZA Nota 91.030, GLD 91/03.
- Rijkswaterstaat (1990); Een toekomstvisie voor de Waal als Hoofdtransportas, Nota I Interimrapportage, Projectbureau Waal.
- Kornman, B.A. (1993); Onderzoek naar de erosie en sedimentatie in kribvakken langs de Waal, RIZA werkdocument 93.149X.
- Langemheen, W. van de (1998); Screening van grootschalige maatregelen, deel A: aanvulling op het protocol screening, RIZA werkdocument 98.180X.
- Lely, C. (1890); Rivieren en rivierwerken, Afd.XI in Waterbouwkunde, N.H. Henket, Ch.M.Schols en J.M.Telders, (1890), blz 453-458.
- Meijer, D.G. (1998); Numerieke modelstudie naar kribaanpassingen, verslag mathematisch modelonderzoek, Alkyon & HKV i.o.v. DWW.
- Mosselman, E. en N. Struiksmā (1992); Effecten van kribverlaging, WL Delft Hydraulics, Q1462.
- Petersen, M.S. (1986); River engineering, Prentice-Hall, Simons and Schuster Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- RVR (1999); Screening van maatregelen, Ruimte voor Rijntakken, RVR-rapport 99.04

- Rijk, L. de (1958); Voorhaven Katerveer, Rapport Modelonderzoek, Waterloopkundig Laboratorium M549.
- Schropp, M.; M. van Wijngaarden; A. v.d. Scheer en B. v.d. Heijdt (2000); Monitoring nevengeulen, Morfologische en chemische monitoring geulen Gamerensche Waard, Datarapportage 1998/1999, RIZA werkdokument 2000.006X.
- Sieben, J. (1999); Lokale morfologische effecten door verlaging van zomerkaden, RIZA werkdokument 99.152X.
- Sieben, J. en N. Douben (2000); Globale inschatting van morfologische effecten in het zomerbed door herinrichting van uiterwaarden. Identificatie van maatregelen, analyse en vuistregels, RIZA werkdokument 2000.027X.
- Sieben, J. (2001a); Gestroomlijnde zomerkaden, de invloed van het dwarsprofiel op energieverliezen bij overlaten, RIZA werkdokument 2001.113X
- Sieben, J. (2001b); Hoogwatereffecten in het zomerbed verkenning kennis en kennisbehoefte, RIZA werkdokument *in voorbereiding*.
- Sieben, J. (2001c); Inrichtingsplan Heesseltsche Waarden, verkenning van morfologische effecten, RIZA 2001.092X.
- Sieben, J. (2002); Rivierkundige aspecten van de experimentele analyse met innovatieve kribben, RIZA werkdokument *in voorbereiding*.
- Simons, H.E.J.; L.Bolwidt en E. Stouthamer (2001); Verwijdering oeverdediging Engelse Werk, Evaluatie 1993-2000, RIZA werkdokument 2001.098X
- Sorber, A.M. (1997) Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995, RIZA rapport 97.015.
- Splunder, I. van en J.A.A.M. Leemans (1997); Ooibosontwikkeling op rivieroever: interactie tussen vegetatie en oevermorfologie, RIZA rapport 97.020.
- Struiksma, N. (1985); Celerity and deformation of bed perturbations travelling over a non-erodible layer, WL Delft Hydraulics, W308.
- Struiksma, N. (1999); Mathematical modeling of bedload transport over non-erodible layers, IAHR symposium on river, coastal and estuarine morphodynamics, Genua.
- Struiksma, N. en H.J.Barneveld (1990); Geulen in uiterwaarden, WL Delft Hydraulics, Q1163.
- Swanenbergh, T., H. Havinga, M.H.I. Schropp en M. Boers (1991); Waal Hoofdtransportas, rivierkundige maatregelen, RWS RIZA en Directie Gelderland, nota nrs RIZA 91.030, GLD 91/03.
- Taal, M. (1995); Compenserende maatregelen voor een nevengeul in de Afferdensche en Deestsche Waard, RIZA nota 95.052
- Thorne, C.R. (1990); Effects of vegetation on riverbank erosion and stability, blz.125-144 in *Vegetation and Erosion*, processes and environment, J.B. Thornes (Ed.), John Wiley and Sons.
- Verhoeven, W.G.M. (2001), mondelinge mededeling, Dienstkring Boven-Rijn en Waal.
- Visser, M. en D.G. Meijer (1999) ; Numerieke modelstudie naar kribaanpassingen, PR213.20 Alkyon & HKV i.o.v. DWW.
- Vuuren, W.E. van (2000); 99 jaar dagafvoeren Lobith. Jaarverlopen 1901-2000, frequentiekaracteristieken en langjarige variaties, RIZA werkdokument 2000.088X.
- Wang, Z.B. en Th. van der Kaaij (1994); Morphodynamic development of secondary channel systems along

Rhine Branches in the Netherlands, WL Delft Hydraulics, Q1963.

Waterloopkundig Laboratorium (1959); Vergelijking van het stroombeeld en de uitschuring bij verschillende kribvormen, rapport modelonderzoek, M610.

WL Delft Hydraulics (1997); Effectiviteit van kribben, Q2360.

WL Delft Hydraulics (1994); Afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed van de Midden-Waal, Q1868

WL Delft Hydraulics (1994); Stroomatlas Midden-Waal, Afvoerpotentialen en diepte-gemiddelde stroomsnelheden, Q1868

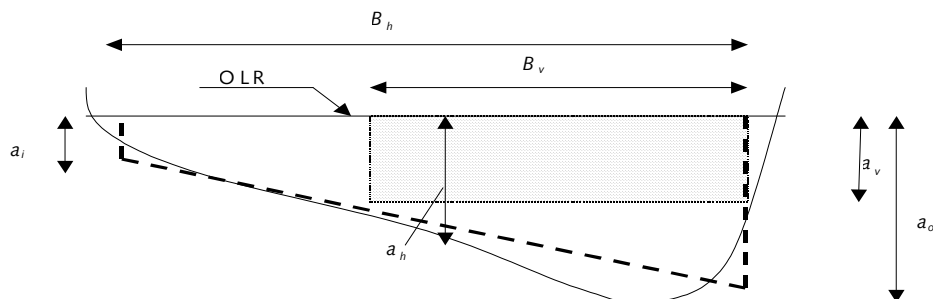
WL Delft Hydraulics (1990); Geulen in de uiterwaard, fase 1: literatuuronderzoek, Q1163.

WL Delft Hydraulics (1999); Report brainstorm on erosion of river banks, Q2529.

Wolfert, H.P. (2001); Geomorphological change and river rehabilitation. Case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands, proefschrift Universiteit Utrecht.

Bijlage A Relatie tussen vaarwegprofiel en gemiddelde waterdiepte

In deze analyse wordt gebruik gemaakt van profiel- en riviertakgemiddelde hoofdgeuldiepte a_h en hoofdgeulbreedte B_h . Dit betekent dat de maatgevende vaargeuldimensies naar één-dimensionale variabelen vertaald moeten worden. Hiervoor wordt een vereenvoudigde schematisatie gebruikt zoals geschetst in Fig.A.1.



Figuur A. Schema maatgevend dwarsprofiel

Veronderstel dat een maatgevende lokatie is te beschrijven als een lineair verloop met een dwarsverhang i_{dwars} , zodat geldt $\frac{a_o - a_v}{B_v} = i_{dwars}$ en $a_o = a_h + \frac{i_{dwars} B_h}{2}$. Uit beide vergelijkingen kan vervolgens de benaderende relatie tussen de breedtegemiddelde hoofdgeuldiepte a_h en het nautisch profiel ($B_v=170$ m

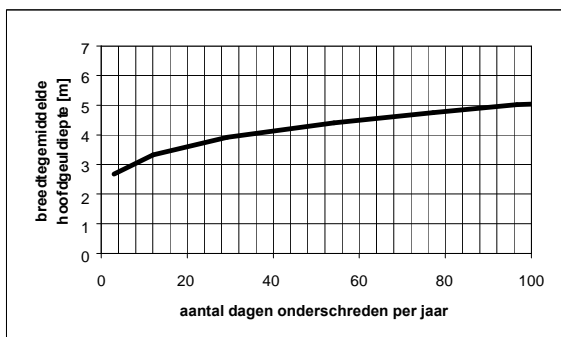
breed en $a_v=2,8$ m diep) worden gevonden $a_h \approx a_v + \left(B_v - \frac{B_h}{2} \right) i_{dwars}$ (A.1)

Dit betekent dat bij een dwarsverhang van ongeveer 2%, de breedtegemiddelde diepte 0,8 m groter is dan de minimale diepte voor het nautisch profiel. Dit brengt de maatgevende minimale breedtegemiddelde diepte op ongeveer 3,6 m. In het vervolg van deze analyse wordt hieraan het symbool a_{min} gegeven.

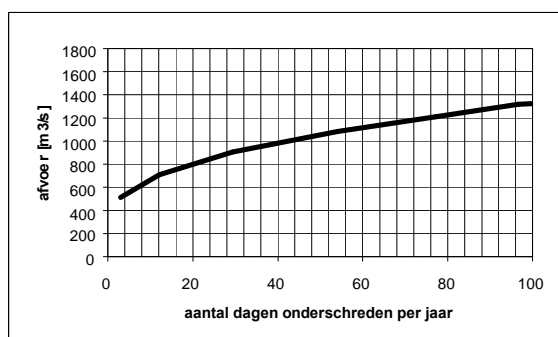
Deze maatgevende waterdiepte a_{min} kan met de formule van Chézy worden omgerekend in een afvoer

$$Q_{min} = B_h C_h a_{min}^{3/2} \sqrt{i_h} \quad (A.2)$$

Ter illustratie het volgende rekenvoorbeeld. Veronderstel een normaalbreedte $B_h = 260$ m; een bodemruwheid $C_h = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ en een bodemverhang $i_h = 10^{-4}$. Dan volgt met Verg.A.2 dat voor een minimale (breedtegemiddelde) diepte van 3,3 m de afvoer minstens $700 \text{ m}^3/\text{s}$ moet zijn. Bij een vaarwegdiepte van $a_v=2,8$ m hoort een gemiddelde hoofdgeuldiepte van ongeveer $a_h=3,6$ m en met Verg.A.2 een afvoer van tenminste $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Als de afvoer wordt gerelateerd aan een afvoeronderschrijdungskromme (zoals in Fig.3.3-a), dan kan worden gevonden $a_v=2,5$ m (Waalafvoer van $700 \text{ m}^3/\text{s}$ gemiddeld circa 12 dagen per jaar (3%) wordt onderschreden, terwijl de vaarweg volgens Verg.6 gemiddeld circa 20 dagen per jaar (5%) ondieper is dan $a_v=2,8$ m (Waalafvoer van $800 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur A.2-a Jaargemiddelde afvoeronderschrijding voor de Waal (tentatief).



Figuur A.2-b Jaargemiddelde diepteonderschrijding op de Waal (met Verg.A.2).

Bijlage B Analytisch model grootschalige morfologie

B.1 Jaarlijkse zandvracht

Het model voor de grootschalige (riviertak)morfologie is gebaseerd op:

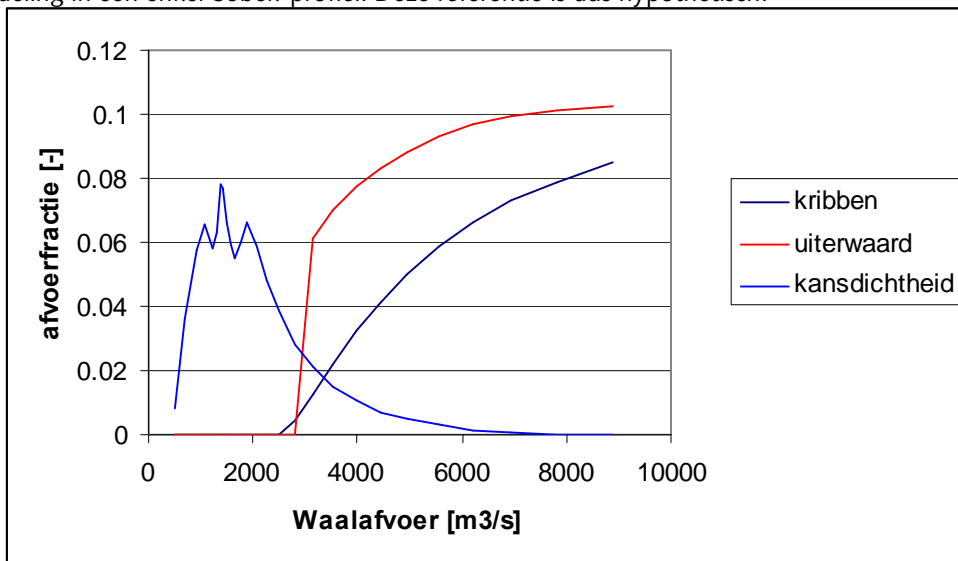
- de wet van Chézy (uniforme stroming) $u_h = C_h \sqrt{ai}$ (B.1-a)
(met C [$m^{1/2}/s$] de Chézy ruwheidscoëfficiënt)
- een benaderende machtswet voor het sedimenttransport $S_h = mB_h(u_h)^n$ (B.1-b)
(met m en n constanten gefit op een bestaande transportvoorspeller)
- de definitie van de profielgemiddelde stroomsnelheid $u_h = Q_h / (B_h a)$ (B.1-c)
(met B_h de hoofdgeulbreedte (normaalbreedte))

Door combinatie van de formules voor waterbeweging en sedimenttransport, kan dit laatste worden geschreven als $S_h = mB_h^{1-n/3} i_h^{n/3} C_h^{2n/3} Q_h^{n/3}$ (B.2)

Integratie over een jaar levert dan voor de zandvracht

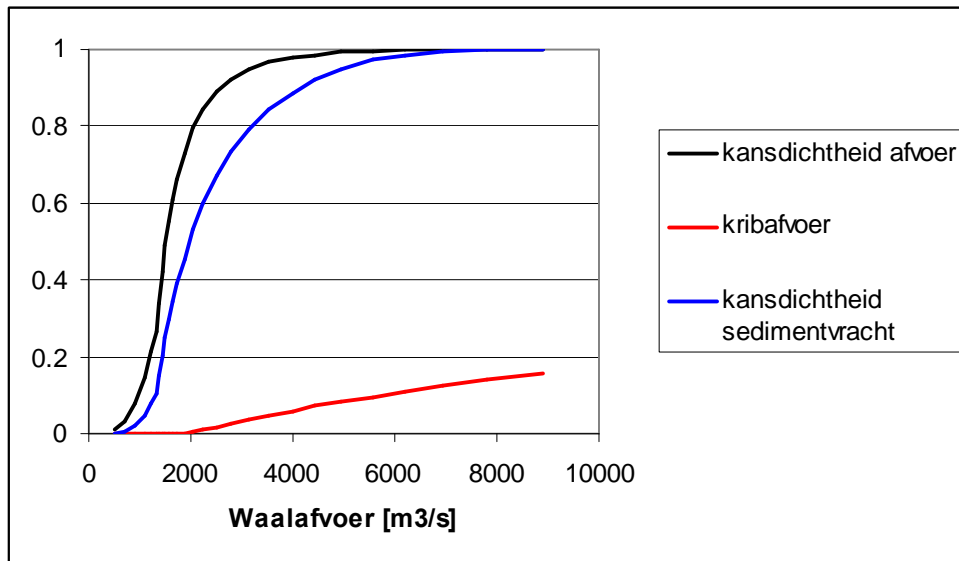
$$V = mB_h^{1-n/3} i_h^{n/3} C_h^{2n/3} T I \quad ; \quad I = \int_{Q/Q_1=0}^{Q/Q_1=Q_{\infty}/Q_1} p \left[\frac{Q_h}{Q_1} \right] Q_h^{n/3} \frac{dQ}{Q_1} \quad (B.3)$$

met p [-] de jaarlijkse kans van voorkomen van een afvoer Q_h door de hoofdgeul. De afvoer Q_1 is een nader te bepalen referentieafvoer. Voor de huidige situatie is als uitgangspunt een verloop voor uiterwaard en kribafvoer aangenomen zoals is weergegeven in Fig.B.1. Dit is gebaseerd op Verg.6.1 en 6.2 en de afvoerverdeling in een enkel Sobek-profiel. Deze referentie is dus hypothetisch.



Figuur B.1 Afvoerverdeling in huidige situatie.

Zoals in Fig.B.2 is weergegeven, is in de huidige situatie de jaarlijkse zandvrachtbijdrage van Waalafvoeren minder dan 1000 m^3/s en meer dan 6000 m^3/s verwaarloosbaar.

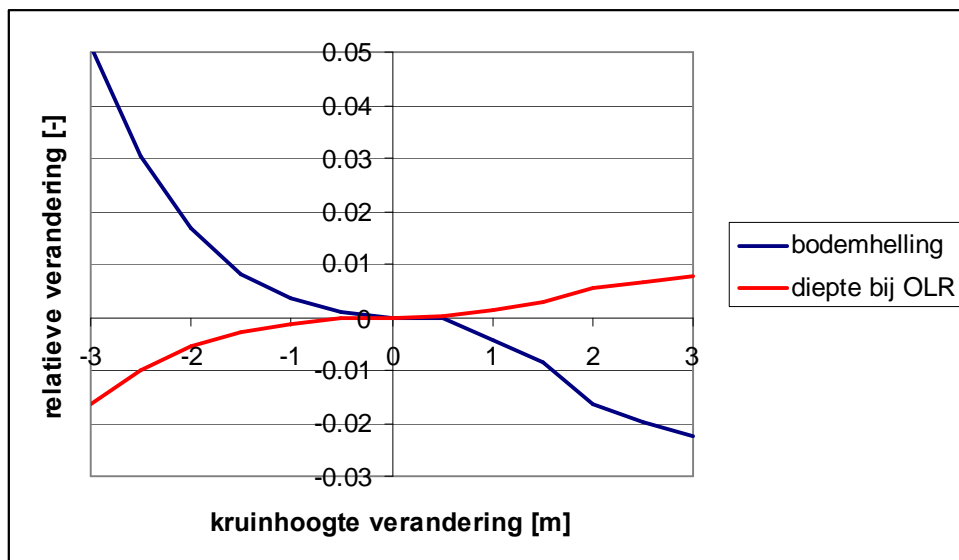


Figuur B.2 Afvoerbijdragen aan jaarlijkse zandvracht.

Als wordt verondersteld dat de grootte van de jaarlijkse sedimentvracht niet verandert (m.a.w. als de gemiddelde sedimentverdeling tussen Waal en Pannerdensch Kanaal, en de sedimentvracht door de Bovenrijn constant blijft), dan kan de verandering in de hoofdgeulafvoer met Verg.B.3 worden gebruikt om de nieuwe bodemhelling te bepalen.

$$\frac{i_{\text{nieuw}}}{i_{\text{oud}}} = \left(\frac{I_{\text{nieuw}}}{I_{\text{oud}}} \right)^{-3/n} \quad (\text{B.4})$$

Deze vergelijking is numeriek opgelost, met de grootte van de kribafvoer bepaald met de afvoerrelatie uit Hoofdstuk 6. Dit levert een verandering in bodemhelling zoals weergegeven in Fig.B.3. De verandering in waterdiepte kan, met behulp van de formule van Chézy, als functie van de nieuwe bodemhelling worden voorspeld.



Figuur B.3 Verandering bodemhelling en waterdiepte.

Tenslotte kan nog, ter indicatie, worden aangegeven een verandering in kruinhoogte zich verhoudt tot een verandering in kriblengte. Op basis van Verg.B.3 kan worden geschreven

$$\frac{i_{\text{nieuw}}}{i_{\text{oud}}} = \left(\frac{B_{\text{nieuw}}}{B_{\text{oud}}} \right)^{(n-3)/n} \left(\frac{I_{\text{nieuw}}}{I_{\text{oud}}} \right)^{-3/n} \quad (\text{B.5})$$

met de tweede term in het rechterlid voor verschillende kruinhoogteveranderingen weergegeven in Fig.B.3 (blauwe lijn). De diepteverandering bij OLR kan worden geschat met de formule van Chézy

$$\frac{a_{nieuw}}{a_{oud}} = \left(\frac{B_{nieuw}}{B_{oud}} \right)^{-2/3} \left(\frac{i_{nieuw}}{i_{oud}} \right)^{-1/3} \quad (\text{B.6})$$

Als wordt gesteld dat er geen diepteverandering bij OLR mag optreden, dan kan met Verg.B.6 de breedteverandering (kriblengte) worden uitgedrukt als verandering in bodemhelling. Door combinatie van

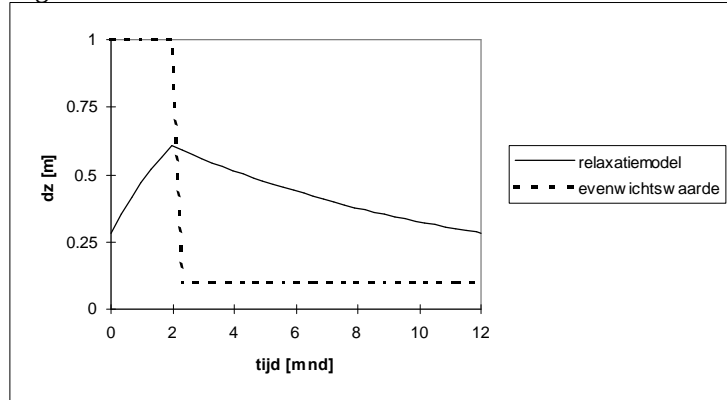
Verg.B.5 en B.6 wordt gevonden
$$\frac{B_{nieuw}}{B_{oud}} = \left(\frac{i_{nieuw}}{i_{oud}} \right)^{1/(n-1)} \quad (\text{B.7})$$

Hiermee kan een combinatie van verlaging en verlenging geschat worden. Bijvoorbeeld 2 m kruinverlaging leidt bij constante breedte tot ongeveer 2% toename in bodemhelling en ongeveer 0,7% diepteafname bij OLR (Fig.B.3). Uit Verg.B.7 volgt dan dat er geen diepteverandering bij OLR zou zijn als deze verlaging wordt gecombineerd met 1% kleinere breedte (ofwel 2,6 m).

Bijlage C Schatting bodemverandering door lokale kribkruinverlaging

In Sieben (1999) is een benadering beschreven om een maat te schatten voor de aanzanding ten gevolge van zomerkadeverlaging. In principe lijkt deze methodiek eveneens geschikt voor het bepalen van de bodemverandering ten gevolge van lokale kruinverlaging. Dit is echter niet geverifieerd.

Om een schatting te maken van het jaargemiddelde effect van lokale kribverlaging, zou een evenwichtswaarde bepaald moeten worden die representatief is voor de lokale bodemverandering. Op basis van een verondersteld relaxatiegedrag is dan een schatting van de maximale, jaarlijkse aanzanding mogelijk. Een voorbeeld van een dergelijk verloop is weergegeven in Fig.4, met de hydrograaf geschematiseerd in twee perioden van hoge en lage afvoer.



Figuur C.1 Voorbeeld relaxatiegedrag.

De maximale waarde die hieruit volgt kan worden beschreven met Verg.C.1. Deze vergelijking kan afzonderlijk worden toegepast voor de breedte-gemiddelde verandering en voor de sinusvormige verandering in dwarsprofiel.

$$\Delta z_{\max} = \Delta z_e \frac{\left(1 - e^{-\frac{T_d}{T_{mh}}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{365 - T_d}{T_{ml}} - \frac{T_d}{T_{mh}}}\right)} \quad (\text{C.1})$$

met

T_d	[dg]	duur van de periode waarin de verlaagde kribben worden overstroomd
T_{mh}	[dg]	morfologische tijdschaal in de hoogwaterperiode
T_{ml}	[dg]	morfologische tijdschaal in de laagwaterperiode
$\otimes z_e$	[m]	evenwichtswaarde van bodemverandering in hoogwaterperiode
$\otimes z_{\max}$	[m]	jaarlijkse maximale waarde van bodemverandering

Voor $\otimes z_e$, de evenwichtswaarde van de bodemverandering kan worden gebruikt (uit WAQUA berekeningen)

$\Delta z_e = -\frac{\Delta q}{q} a$, met $\frac{\Delta q}{q}$ de relatieve verandering in q [m^3/s] de afvoer per eenheid van breedte, en a [m] de

waterdiepte. De tijdschalen kunnen worden geschat met $T = L/c$, met L [m] de lengte van de gradiënt in

$\frac{\Delta q}{q}$ vanaf de bovenstroomse rand van de ingreep (maximaal 1 km), en c [m/s] een representatieve

voortplantingssnelheid (circa 10 m/dag tijdens hoogwater, en ongeveer 2 á 3 m/dag tijdens lagere afvoeren).

Ter illustratie van C.1 het volgende voorbeeld. In de huidige situatie worden de kribben gemiddeld bijna 40 dagen per jaar overstroomd. De gemiddelde Waalafvoer in die periode is $4.655 \text{ m}^3/\text{s}$. Veronderstel dat met 1

m verlaagde kribben gedurende 100 dagen worden overstroomd bij een gemiddelde Waalafvoer van 3.232 m³/s.

Veronderstel dat de afvoerverdeling ongeveer 500 m vanaf de bovenstroomse rand van de ingreep aan de nieuwe situatie (met lokaal veranderde kribben) is ingesteld (dus $L=500$ m). De morfologische tijdschaal tijdens hoogwater wordt geschat met $T_{mh}=500/10=50$ dg en tijdens lagere afvoeren $T_{mh}=500/2=250$ dg. Met Verg.C.1 kan de jaarlijks gemiddelde aanzanding door lokale verlaging van de kribben dan worden

geschreven als
$$\Delta z_{\max} = \Delta z_e \frac{\left(1 - e^{-\frac{100}{50}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{365-100}{250} - \frac{100}{50}}\right)} = -0,9 \frac{\Delta q}{q} a$$

Bijlage D Invloed afvoer en sedimentverdeling op evenwichtsbodemhelling.

D.1 Model

Een dergelijke afvoerverandering leidt niet alleen tot een groei van de lokale bodemsprong in de Waal ter plekke van de Pannerdensch Kop (Asmerom, 2001), maar ook tot een aanpassing in Waal-bodemhelling van het langprofiel. Een indicatie van het laatste wordt gegeven in het volgende intermezzo.

In deze verkenning van het effect van de bovenrand wordt per jaar, de Waalafvoer als constant verondersteld. Veronderstel dat het sedimenttransport kan worden beschreven met een machtswet

$$S = Bmu^n \text{ (met } O(n)=5\text{).} \quad (\text{D.1})$$

Veranderingen in snelheid zijn dan voor een evenwichtssituatie te schrijven als $u_1 / u_0 = (S_1 / S_0)^{1/n}$.

De diepte is te definiëren als $a = Q / uB$ zodat diepteveranderingen kunnen worden geschreven als

$$a_1 / a_0 = Q_1 / Q_0 (S_1 / S_0)^{-1/n}. \text{ De bodemhelling is met de formule van Chézy te schrijven als}$$

$$i = (Q / BC)^2 a^{-3}. \text{ De nieuwe evenwichtswaarde van de bodemhelling is dan te schatten met}$$

$$\frac{i_1}{i_0} = \left(\frac{Q_1}{Q_0} \right)^{-1} \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{3/n} \quad (\text{D.2})$$

D.2 Splitsingspuntrelatie

Door de verandering in afvoerverdeling zal waarschijnlijk ook de sedimentverdeling op de Pannerdensch Kop veranderen. Een indicatie van deze verandering in sedimentaanbod kan worden gegeven met een splitsingspuntrelatie. Veronderstel bijvoorbeeld dat deze sedimentverdeling in een splitsingspunt met tak 1 en tak 2 kan worden geschat met een machtswet van de

$$\text{vorm } \frac{S_1}{S_2} = \beta \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^\alpha \quad (\text{D.2})$$

Ter bepaling van α is het nodig verschillende experimenten, met verschillende splitsingspunten (α -waarden) met elkaar te vergelijken. Dit is als volgt gedaan. Veronderstel dat voor elke dataset een referentieverdeling van sediment en afvoer kan worden bepaald waarvoor geldt

$$\frac{S_{ref1}}{S_{ref2}} = \beta \left(\frac{Q_{ref1}}{Q_{ref2}} \right)^\alpha \quad (\text{D.3})$$

Om verschillende experimenten met elkaar te kunnen vergelijken is de referentieverdeling moet representatief zijn voor de dataset; een gemiddelde van de waarnemingen ligt voor de hand. Vanwege de voorgestelde niet-lineaire relatie wordt daarom gebruikt

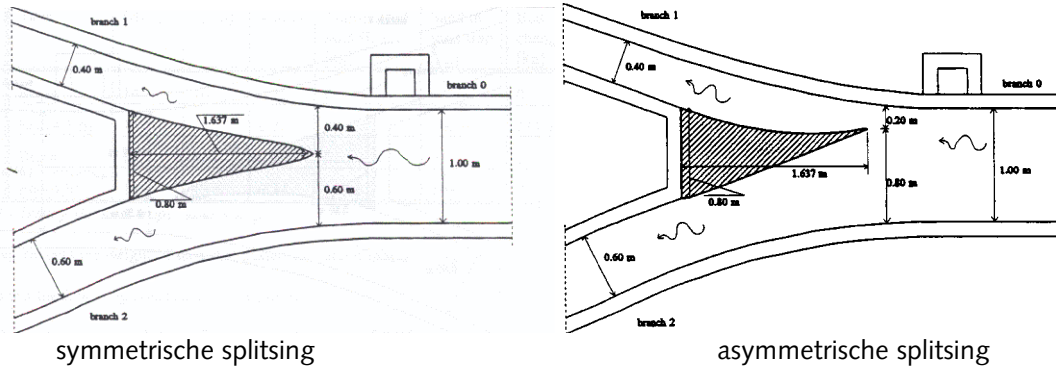
$$\frac{S_{ref1}}{S_{ref2}} = e^{\frac{1}{N} \sum \ln S_1 / S_2} \text{ en } \frac{Q_{ref1}}{Q_{ref2}} = e^{\frac{1}{N} \sum \ln Q_1 / Q_2} \quad (\text{D.4})$$

Door Verg.D.2 en D.3 te combineren kan dan worden gevonden

$$S = Q^\alpha \text{ met gemakshalve als } S = \frac{S_1 / S_2}{S_{1ref} / S_{2ref}} \text{ en } Q = \frac{Q_1 / Q_2}{Q_{1ref} / Q_{2ref}} \quad (\text{D.5})$$

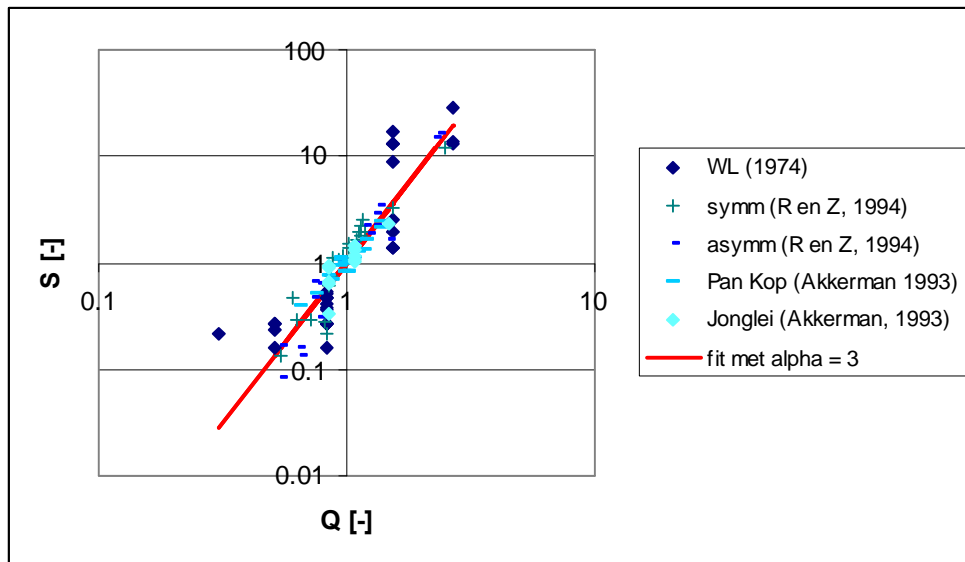
In deze relatie is alleen de macht α een onbekende. Hiermee is de normering van een dataset compleet en worden, ter toetsing van de hypothesen, verschillende experimenten vergelijkbaar. De volgende data sets zijn gebruikt.

De waarnemingen in het schaalmodel van WL (1974) betrof een onderzoek naar de afvoer- en sedimentonttrekking t.b.v. de Maas-Waal centrale. De waarnemingen van Roosjen en Zwanenburg (1994) zijn van twee schaalmodellen met verschillende splitsingspunten (Fig.D.1).



Figuur D.1 Meetopstelling in Roosjen en Zwanenburg (1994).

Tenslotte zijn de waarnemingen uit het schaalmodel van de Pannerdensche Kop en Jonglei gebruikt (Akkerman, 1993). Al deze waarnemingen zijn met een normering volgens Verg.D.5 in Fig.D.2 weergegeven. De spreiding is redelijk groot (dubbellogaritmische assen!), maar de trend lijkt overeen te komen met $\alpha=3$. Voor de gebruikte data lijkt $\alpha=3$ dus een goede waarde.



Figuur D.2 Combinatie van databases.

Voor de splitsingspuntrelatie van de Pannerdensche Kop wordt dan tenslotte gebruikt (Wang en Van der Kaaij, 1994).

$$\frac{S_{Waal}}{S_{PanKan}} = \left(\frac{B_{Waal}}{B_{PanKan}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{Q_{Waal}}{Q_{PanKan}} \right)^{\alpha} \text{ met } \alpha=3 \text{ volgens Fig.D.2.} \quad (\text{D.6})$$

D.3 Bodemhelling verandering

Met behulp hiervan kan de relatieve verandering in het sedimentaanbod aan de Waal geschat worden

$$\text{met } \frac{\Delta S_{Waal}}{S_{Waal}} \approx \alpha \left(1 + \frac{S_{Waal}}{S_{PanKan}} \right)^{-1} \left(1 - \frac{Q_{Waal}}{Q_{BRijn}} \right)^{-1} \frac{\Delta Q_{Waal}}{Q_{Waal}} \approx 3 \frac{1}{3} \frac{1}{0.3} \frac{\Delta Q_{Waal}}{Q_{Waal}} = 3 \frac{\Delta Q_{Waal}}{Q_{Waal}} \quad (\text{D.7})$$

De geschatte afname in het sedimentaanbod is dus ongeveer driemaal zoveel als de afname in Waalafvoer. Een 10% afname in afvoer (wat volgens Fig.3.6 in de periode 1920-2000 is gebeurd) zou dan gepaard gaan met een 30% afname in sedimentaanbod. Met Verg.D.2 kan dan worden gevonden voor de nieuwe evenwichtswaarde van de bodemhelling $i_1 / i_0 = (0.9)^{-1} (0.7)^{3/3} = 0.9$.

Als de bodemligging ter plekke van de Pannerdensche Kop 10 m hoger ligt dan de bodemligging in de mond, dan betekent 10% afname in bodemhelling een bodemdaling van 1 m bij de Pannerdensche Kop.

