

# Vorbereiding kribvaksuppletie Waal



Blueland Consultancy

Rapport B21.01



# Vorbereiding kribvaksuppletie Waal

Wilfried ten Brinke, Blueland Consultancy

In samenwerking met Kees Sloff, Deltares

25 juni 2021

## **Verantwoording**

Deze notitie is opgesteld door dr. W. ten Brinke (Blueland Consultancy) in samenwerking met dr. ir. K. Sloff (Deltares), onder begeleiding van dr. ir. E. ten Cate (Rijkswaterstaat Oost-Nederland)

juni 2021

	Blz
<b>1. Aanleiding kribvaksuppletie Waal</b>	<b>X</b>
<b>2. Vraagspecificatie</b>	<b>X</b>
2.1. Beschrijving rivierkundige werking kribvak	X
2.2. Onderzoeksvragen	X
2.3. Schets van mogelijke maatregelen	X
2.4. Programma van eisen	X
2.5. Voorstel selectie kribvakken	X
<b>3. Monitoring</b>	<b>X</b>
3.1. Monitoringsplan	X
3.2. Monitoringsorganisatie	X
<b>Referenties</b>	<b>X</b>

## 1. Aanleiding kribvaksuppletie Waal

Het zomerbed van de Waal is in de loop van ruim anderhalve eeuw steeds lager komen te liggen. Oorzaken zijn ingrepen in de rivier, met name de versmalling van de hoofdgeul, en baggerwerk. De effecten van de ingrepen in het verleden werken nog steeds door in de morfologische aanpassing van de rivier. Bovendien zullen meer recente ingrepen en het huidige rivierbeheer in de Rijn, in Duitsland en Nederland, de ontwikkeling van de bodemligging beïnvloeden. De netto onttrekking van zand en grind door grootschalig baggeren in het zomerbed is inmiddels gestopt; zand en grind dat van ondieptes wordt gebaggerd, wordt in diepere delen van de rivier teruggestort.

De verlaging van het zomerbed van de Waal gaat nog steeds door en de negatieve gevolgen voor verschillende functies van de rivier worden steeds duidelijker. Een van die gevolgen is de beperking van de vaardiepte van de Waal ter hoogte van onder meer de vaste laag bij Nijmegen tijdens droge zomers met een lage Rijnaafvoer. Rijkswaterstaat verkent opties om verdere erosie van het zomerbed tegen te gaan. Een van die opties is het storten (suppleren) van zand en grind op de stranden tussen de kribben. De hypothese is dat golven en stroming van passerende schepen, al dan niet in combinatie met de stroming door de rivierafvoer, dit materiaal in beweging brengen en naar het zomerbed voeren. Hiermee zou de erosie van het zomerbed kunnen worden gereduceerd en zouden de gesuppleerde kribvakken als 'zandmotor' voor de rivier kunnen gaan fungeren. De hypothese is gebaseerd op onderzoek in de jaren '80 en '90 van de vorige eeuw.

Dit onderzoek geeft al veel aanwijzingen hoe de suppletie van de kribvakken het best kan worden uitgevoerd, maar er zijn ook nog veel vragen hoe hiermee het best een 'zandmotor' voor de rivier kan worden gerealiseerd. Rijkswaterstaat heeft daarom besloten een kribvaksuppletie uit te voeren als pilot voor kennisontwikkeling. In deze notitie is de beschikbare kennis uit het verleden samengevat, zijn openstaande onderzoeksvragen geformuleerd en is beschreven hoe de suppletie het best kan worden uitgevoerd om de kans op het goed functioneren als 'zandmotor' zo groot mogelijk te laten zijn. De pilot biedt echter ook ruimte om meer kennis hierover te ontwikkelen. In deze notitie is daarom ook een monitoringsplan opgenomen waarmee die kennisontwikkeling kan worden gevoed.

De pilot is onderdeel van een overkoepelende pilot om de bevaarbaarheid over de vaste laag bij Nijmegen te verbeteren. Doordat deze vaste laag niet mee daalt met de structurele bodemerosie vormt de beperkte vaardiepte ter plaatse in toenemende mate een knelpunt voor de scheepvaart waardoor schippers in toenemende mate de aflaaddiepte van hun schepen moeten beperken. In afwachting van een structurele oplossing worden er drie maatregelen uitgevoerd: 1) afvlakken van de vaste laag door het wegschuiven van hogere delen; 2) verminderen van de abrupte overgang naar ondiep vaarwater; en 3) suppleties in kribvakken t.b.v. kennisontwikkeling rivierbodembeheer.

## 2. Vraagspecificatie

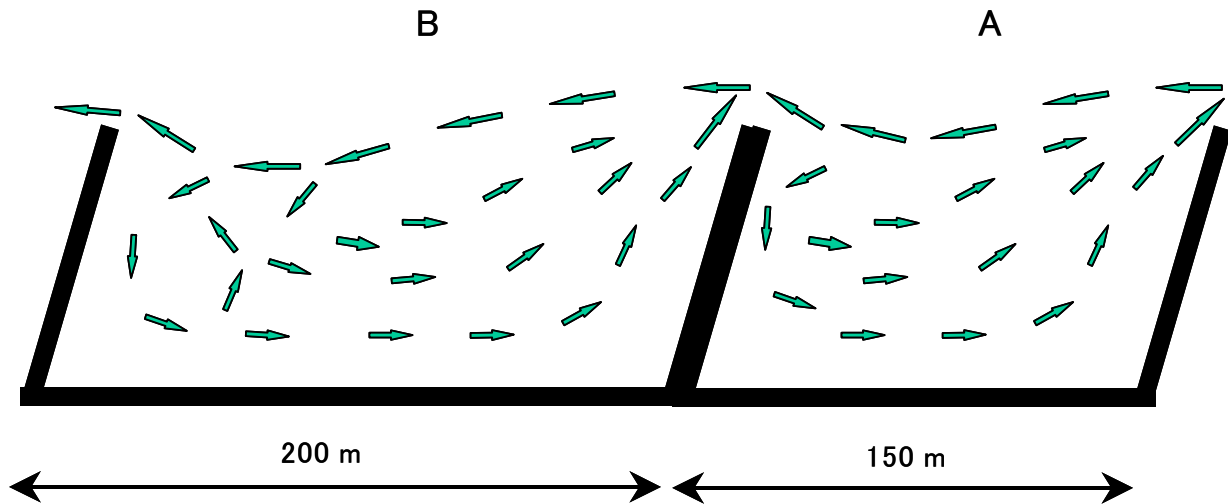
### 2.1. Beschrijving rivierkundige werking kribvak

#### 2.1.1. Stroming in kribvakken zonder scheepvaart

De aanwezigheid van kribben leidt tot het optreden van een neerstroming in het kribvak. In het benedenstroomse deel van het kribvak zal de rivierafvoer, zij het zwak, het kribvak instromen. Bij de benedenstroomse krib van het kribvak zal een deel van de rivierafvoer door de krib in een richting naar de oever worden geleid en van daaruit middels de neer naar de bovenstroomse krib terugstromen. Daar kan de stroming het vak weer verlaten. Deze situatie is geschetst in figuur 1. Situatie A geldt als de afstand tussen de kribben voldoende klein is om één neer het hele vak te laten beslaan. Voor de Waal zijn dit de kribvakken met een kribvaklengte (= onderlinge kribafstand) van

130-150 m. Veel kribvakken langs de Waal hebben echter een lengte van  $\pm 200$  m. In deze kribvakken kan de ene neer, horende bij de wervel benedenstrooms van de krib, het hele kribvak niet beslaan, en ontstaat er een tweede, kleinere neer in het benedenstroomse deel van het kribvak (figuur B).

Uit metingen langs de Waal is gebleken dat het water in deze neerstroming op 8,5 cm boven de bodem, zonder invloed van passerende schepen, over het algemeen niet harder stroomt dan 30 cm/sec. Uit deze metingen bleek ook dat het daarbij niet hard genoeg stroomde om het zand van de kribvakstranden in beweging te brengen (Ten Brinke, 2003).

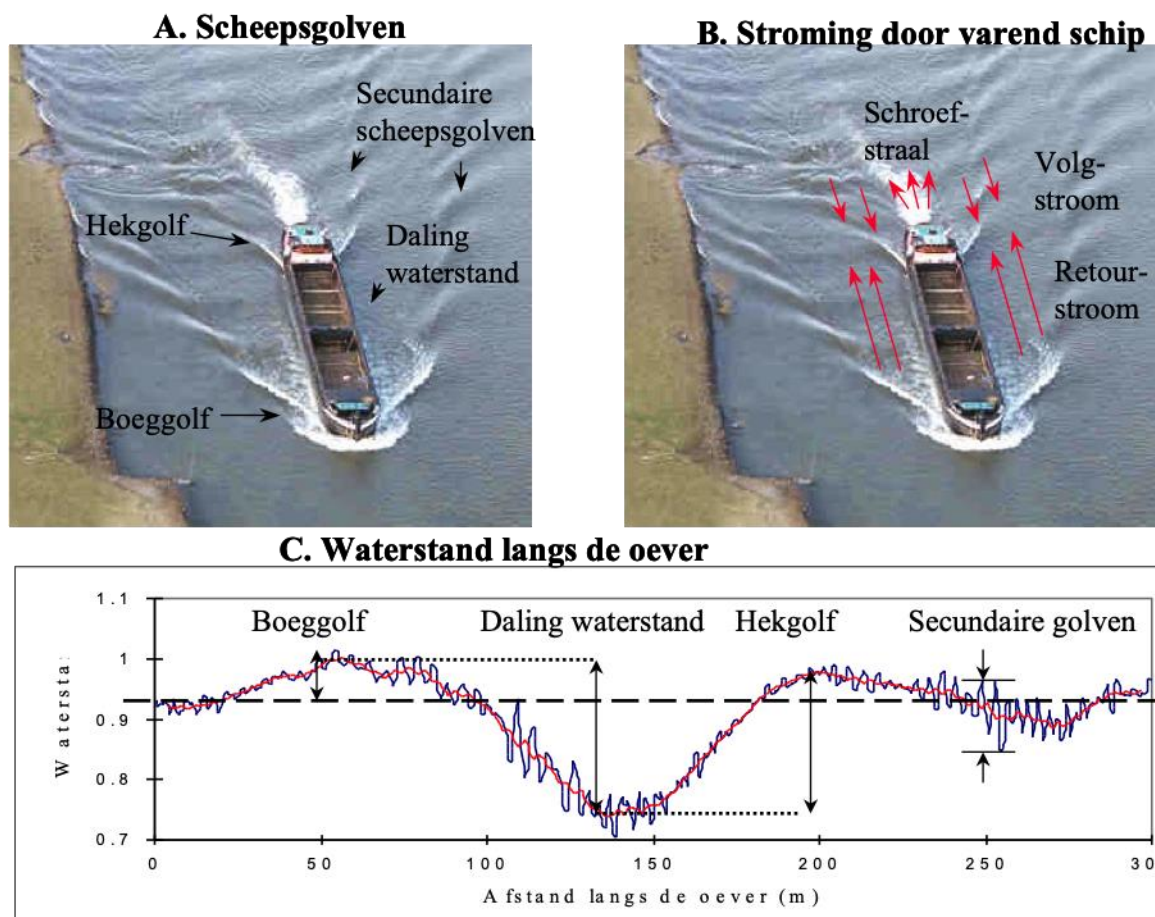


Figuur 1. Circulatiecellen van de waterbeweging in een kribvak die worden versterkt door de waterbeweging als gevolg van passerende schepen: A voor een klein kribvak (één neer), B voor een groot kribvak (2 neren).

### 2.1.2. De waterbeweging rond een varend schip

Een varend schip wekt golven en stroming op. De golven worden onderverdeeld in primaire en secundaire golven. De primaire golf is de opstuwing van het water bij de boeg van het schip (boeggolf), de waterspiegeldaling aan de zijkant van het schip, en de haalgolf (heggolf) bij het hek van het schip. De secundaire golven zijn de korte golven die naast en vlak achter een schip ontstaan. Het ruimtelijke patroon van deze golven is geïllustreerd in figuur 2A. De hiermee gepaard gaande stroming rond het schip staat in figuur 2B. In figuur 2C is weergegeven hoe de golfpatronen worden waargenomen langs de oever.

De door een varend schip opgewekte stroming bestaat uit de schroefstraal en de stroming als gevolg van de primaire golfbeweging. Laatstgenoemde stroming is voor de sedimenthuishouding van een kribvak van groot belang omdat deze de zuiging van water uit kribvakken veroorzaakt en met deze zuiging en het weer vollopen van het vak de neerstroming in het kribvak versterkt. De stroming horende bij de primaire golf bestaat uit de retourstroom en de volgstroom. De retourstroom ontstaat doordat het bij de boeg opgestuwde water terugstroomt naar de waterstandsval aan de zijkant tot bij de achterzijde van het schip. De volgstroom ontstaat door het opvullen van de waterstandsval tussen het schip en de oever vanuit de hogere waterstand achter het schip.



Figuur 2. Het ruimtelijk patroon van door een varend schip geïnduceerde scheepsgolven (A) en stroming (B) gerelateerd aan een gemeten registratie van de waterstand langs de oever (C).

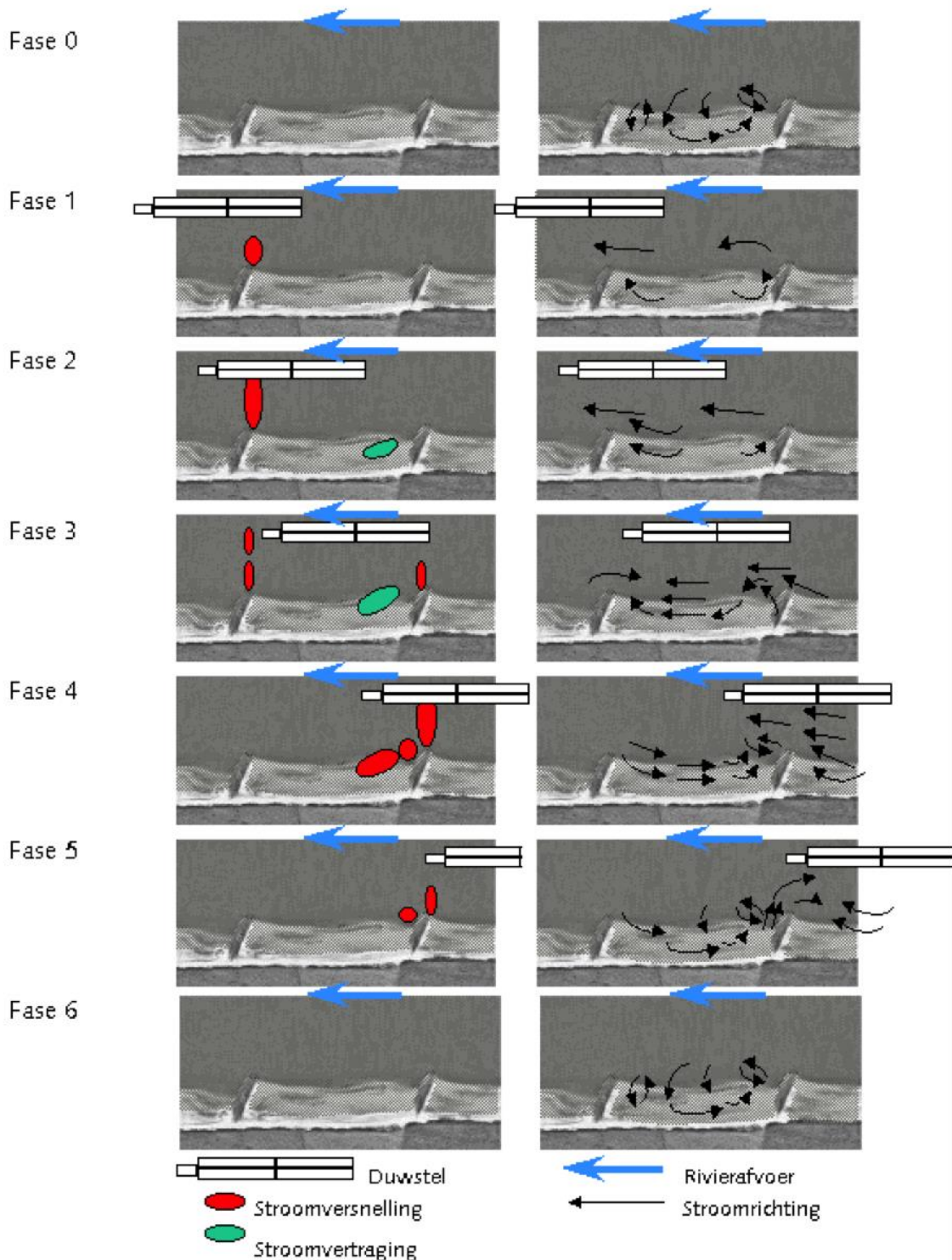
### 2.1.3. Stroming in kribvakken met scheepvaart

De waterbeweging rond een varend schip beïnvloedt de waterbeweging in een kribvak. In een kribvak verandert deze invloed tijdens de passage van een schip. Dit is geschetst in figuur 3. Het linkerdeel geeft in 7 tijdstappen aan hoe de passage van een 4-baksduwstel de stroom in en nabij een kribvak vertraagt en versnelt. Het rechterdeel geeft, voor dezelfde 7 tijdstappen, aan welke stroomrichtingen bij deze vertragingen en versnellingen horen.

In de situatie vóór de passage van een duwstel is er sprake van een zwakke neerstroming in het kribvak, met een grote en kleine neer (fase 0). Op het moment dat de boeg van een duwstel een krib passeert (fase 1), wordt het bovenstroomse kribvak leeggezogen door de retourstroom. Hierdoor verdwijnt de kleine neer in het benedenstroomse deel van het kribvak vrijwel en wordt de hoofdneer in het bovenstroomse deel van het kribvak sterk gereduceerd (fase 2). Daarnaast ontstaat door de retourstroom tussen krib en duwstel een wervel benedenstrooms van de kribkop. Bij het hek van het duwstel houdt de retourstroom op en begint de volgstroom, waarbij de stroomrichting omkeert. Dit is te zien aan de pijltjes in fasen 3-5 bij de achterzijde van het schip. Deze volgstroom vult het kribvak weer op. Passeert het hek een krib (fasen 4 en 5), dan wordt de volgstroom gedwongen vanuit het kribvak af te buigen in de richting van de rivieras. Deze volgstroom ontmoet bij de kribkop de retourstroom die net bovenstrooms van het hek de andere kant op gaat. Hierdoor wordt de neer net benedenstrooms van de krib versterkt. Als het hek de bovenstroomse krib passeert (fase 5), wordt de volgstroom merkbaar in het bovenstrooms van deze krib gelegen kribvak. Ná passage van het schip keert de situatie van vóór de passage weer terug (fase 6 = fase 0). Uit bovenstaande blijkt dat de



maximale stroming optreedt juist benedenstrooms van de kribben tijdens de passage van het hek van het schip. Deze stroming wordt aangedreven door de retourstroom tussen kribkop en duwstiel en de uittredende volgstroom.



*Figuur 3. De versnelling en vertraging van de stroom (links) en de bijbehorende stroompatronen (rechts) in opeenvolgende fasen van de passage van een 4-bakduwstiel langs een kribvak bij Druten (op basis van de beschrijvingen van Robberecht en Wentink (1986), Verhey en Vermeer (1987) en Termes et al. (1991)).*

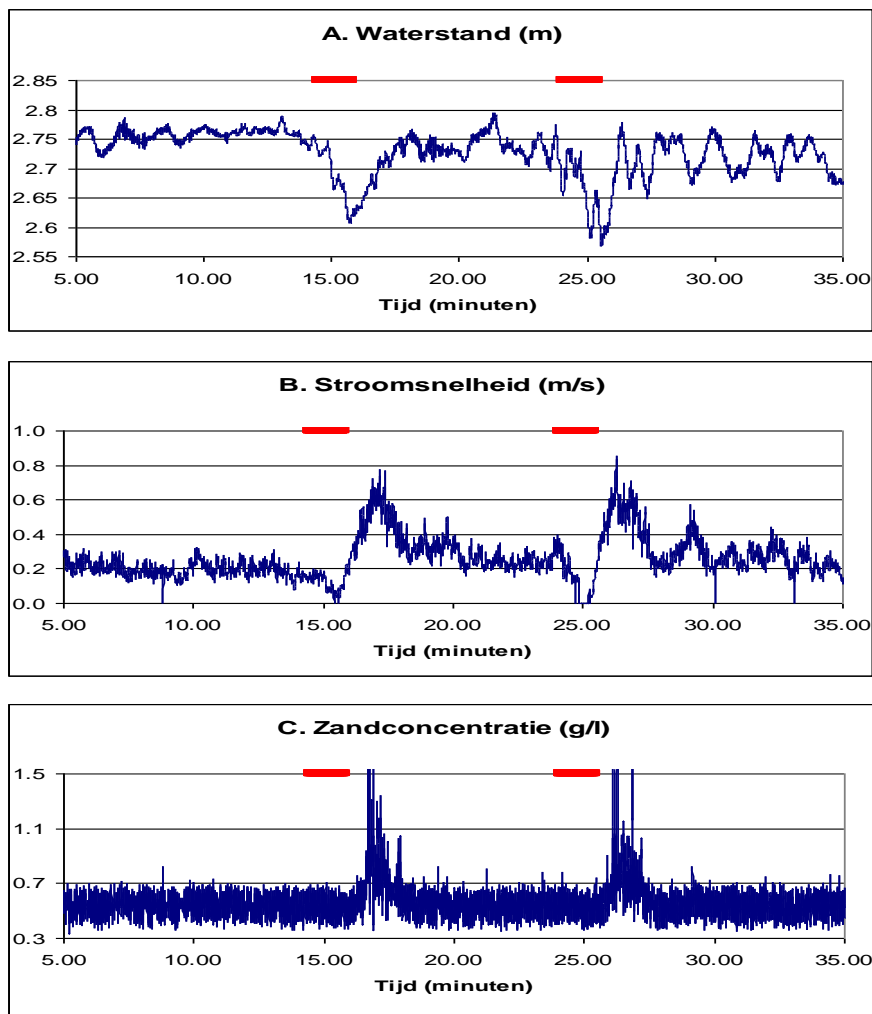
De passage van een schip leidt in principe tot een lichte verhoging van de waterstand (boeggolf), gevolgd door een aanmerkelijk forsere daling van de waterstand (leegzuigen kribvak) en daarna het weer stijgen van de waterstand (vollopen kribvak en passage hekgolf), gevolgd door een reeks secundaire golven achter het schip. Over het algemeen zijn de daling van de waterstand en de secundaire golven de meest markante verschijnselen die aan het kribvakstrand worden waargenomen. De waterstandsverhoging door de boeggolf wordt niet of nauwelijks waargenomen.

#### **2.1.4. Stroming en sedimenttransport in kribvakken met scheepvaart**

Uit metingen langs de Waal is gebleken dat de passages van schepen leiden tot een daling van de waterstand in het kribvak met maximaal 20 cm, een verhoging van de stroomsnelheid nabij de bodem<sup>1</sup> in het uitstroompunt tot veelal 40-50 cm/s voor de grootste schepen, met uitschieters tot 80 cm/s en een forse toename van de zandconcentratie in het water (figuur 4). Door het passeren van een groot schip stijgt de bodemschuifspanning boven het zandstrand tot boven de kritische erosieschuifspanning van het zand. Dit zand wordt via het uitstroompunt net benedenstrooms van de krib naar de rivier gevoerd. De opgewekte schuifspanning is een combinatie van het effect van (secundaire) golven en (zuig)stroming; de stroming door het leeglopen (zuiging) van het kribvak levert een veel grotere bijdrage aan de totale schuifspanning dan de secundaire golven. Het leegzuigen en weer volstromen van kribvakken door passerende scheepvaart is kennelijk het dominante proces dat in kribvakken de hoge schuifspanningen voor erosie van zand oplevert.

---

<sup>1</sup> De metingen zijn verricht op 10 cm boven de bodem



Figuur 4. Een voorbeeld van een meetserie van 35 minuten van de waterstand (A), stroomsnelheid (B) en de zandconcentratie (C) in het uitstroompunt van een kribvak nabij de kop van de bovenstroomse krib. Met een rode lijn zijn de tijdsperioden aangegeven gedurende welke twee beladen 4-baksduwstellen, varend in stroomopwaartse richting, de meetlocatie passeerden.

### 2.1.5. Kribvakken in bochten versus kribvakken langs rechte riviertrajecten

De secundaire stroming bepaalt grotendeels de water- en sedimentbeweging, en morfologie in rivierbochten. Daardoor is de invloed van passerende schepen op de water- en sedimentbeweging in kribvakken in bochten anders dan in een recht traject van de rivier.

In kribvakken in buitenbochten domineert de invloed van de rivierafvoer over de invloed van waterbeweging door scheepvaart. Passerende schepen veroorzaken over het algemeen geen sterke verhoging van de schuifspanning waardoor zand in het vak wordt geërodeerd en naar de rivier wordt gevoerd. Het zandtransport staat hier sterk onder invloed van de stroming die in de buitenbocht relatief sterk is; de kribvakstranden zullen in buitenbochten veelal in evenwicht zijn met deze stroming. Dit betekent dat de stranden daar minder breed zijn dan elders langs de rivier, dieper het vak in liggen en met relatief grover sediment zijn gevuld. De invloed van passerende schepen is daardoor beperkt. Wel zal door de ligging van de vaargeul in de diepere buitenbocht en de richting van de schroefstraal van passerende schepen, de potentie voor erosie van gesuppleerd sediment in de kribvakken sterker kunnen zijn.

In kribvakken in binnenbochten zijn de stranden weliswaar vaak zeer breed, maar onderdeel van de pointbar waardoor schepen ver uit de oever passeren. Uit metingen is gebleken dat passerende schepen geen opvallend hogere stroomsnelheden boven het strand in kribvakken in de binnenbocht veroorzaken.

De waterbeweging die passerende schepen in kribvakken veroorzaken is, ten opzichte van de waterbeweging door de rivierafvoer, in binnen- en buitenbochten over het algemeen minder sterk dan in kribvakken langs een recht riviertraject en in de rechtstanden tussen twee opeenvolgende bochten (bochtovergangen).

### 2.1.6. Kribvakken aan de noordoever versus kribvakken aan de zuidoever

De sterkte van de stroming die passerende schepen in een kribvak veroorzaken, hangt af van de eigenschappen van die schepen. De, voor deze stroming, belangrijkste eigenschappen zijn het volume dat een schip onder water inneemt en de afstand waarop een schip een kribvak passeert. Het onderwatervolume bepaalt de grootte van de waterverplaatsing (zuiging en weer volstromen) in een kribvak (en dus de grootte van de retour- en volgstroom). De grootte van dit onderwatervolume hangt af van de grootte en de beladingsgraad van een schip. Op de Waal varen dezelfde schepen heen en weer. De beladingsgraad van de schepen verschilt wel sterk tussen de opgaande vaart (veelal van Rotterdam naar Duisburg) en de afgaande vaart (veelal terug naar Rotterdam). De opgaande vaart is veelal vol beladen en vaart langs de zuidoever. De veelal minder vol beladen afgaande vaart vaart het dichtst langs de noordoever.

Als een groot schip vol beladen naar Duisburg vaart, veroorzaakt deze aan de zuidoever in een kribvak in principe een sterkere stroming en meer zandtransport dan op de terugtocht aan de noordoever als het schip leeg of minder vol beladen naar Rotterdam terugkeert. Deze verschillen zijn gemeten in kribvakken, zowel direct wat betreft de stroming en zandconcentratie als indirect wat betreft de hoogteligging van het kribvakstrand. Uit onderzoek<sup>2</sup> in de jaren '90 van de vorige eeuw is geconcludeerd dat de erosie van kribvakstranden langs de Waal door scheepvaart langs de zuidoever twee keer zo groot is als langs de noordoever (figuur 5). Ook uit de monitoring van een kribvaksuppletie in de Waal kwamen deze verschillen tussen de noord- en zuidoever naar voren (Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2002). Overigens bleek uit datzelfde onderzoek dat een hoge rivierafvoer, waarbij de kribben ruim onder water staan, deze erosie teniet doet met een ongeveer twee keer zo grote sedimentatie in de vakken langs de zuidoever vergeleken met die langs de noordoever.

Het is ook denkbaar dat het verschil maakt of een schip met de stroom mee of tegen de stroom in vaart. Dit zou tot verschillen kunnen leiden in de wijze waarop, en de mate waarin, de waterbeweging door een passerend schip doorwerkt tot in een nabijgelegen kribvak. Dit aspect is echter niet onderzocht. In de praktijk maakt een schip (vooral grote eenheden) in de afvaart optimaal gebruik van de zwaartekracht. Er wordt tot ca 20% voortstuwingsvermogen gebruikt t.o.v. het vermogen in de opvaart. Hiermee wordt niet alleen brandstof bespaard, maar blijft er ook extra vermogen over om afvarend onverwachte manoeuvres te kunnen maken. Omdat de meeste schepen relatief dicht langs de oever varen aan de rechterzijde van het schip (stuurboordwal) wordt de noordoever van de Waal het meest belast door de met minder vermogen afvarende schepen (mondelinge mededeling Henk Eerden).

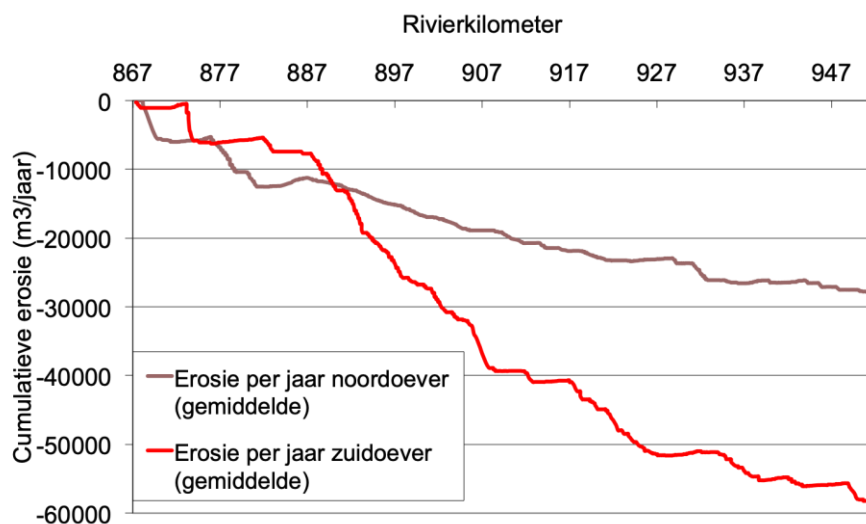
Verwacht mag worden dat de verschillen in de invloed van scheepvaart aan de zuidoever versus de noordoever ook effect hebben op de rivierbedding in de vaargeul, hetzij direct door verschillen in de stroming rond het schip, hetzij indirect door verschillen in de zandaanvoer vanuit de kribvakken.

---

<sup>2</sup> In dit onderzoek zijn ook resultaten van veld- en laboratoriumonderzoek uit de jaren '80 van de vorige eeuw betrokken (voor de referenties: zie Ten Brinke (2003)).

Dergelijke effecten zijn inderdaad waargenomen. Zo bleek in 1995 de korrelgrootte van het zand in de bovenste 5 cm van de rivierbedding bij de zuidoever fijner te zijn dan bij de noordoever (Ten Brinke et al. (1998), in Ten Brinke (2003)), waarschijnlijk door een groter zandverlies uit de kribvakken aan de zuidoever (met relatief fijn zand) door de passerende beladen scheepvaart. Dit verschil in korrelgrootte is ook geconstateerd uit analyses van een vergelijkbare bemonstering van de toplaag van de Waal in 2020 (mondelijke mededeling Michiel Reneerkens). Ook bleken uit studies in het verleden de eigenschappen van beddingvormen op de bedding van de Waal systematisch te verschillen tussen de noordelijke en zuidelijke helft van de bedding (Ten Brinke en Wilbers (1999), in Ten Brinke (2003)), en werd in kribvakstranden minder bodemleven aangetroffen aan de zuidoever dan aan de noordoever (Klink (2001), in Ten Brinke (2003)).

De kracht die (grote) schepen op de bodem van de Waal uitoefenen is in de afgelopen tientallen jaren waarschijnlijk toegenomen. De maximale aflaaddiepte van de schepen is vanaf ca. 1990 toegenomen (tot nu zelfs 4,50 m), waardoor de grote schepen gedurende langere tijd van het jaar dicht bij de bodem varen. Door de retourstromen onder en naast het schip en de zeer hoge schroefstraalbelasting wordt mogelijk veel sediment uit de actieve laag van het zomerbed in suspensie gebracht en daardoor versneld stroomafwaarts getransporteerd. Deze veranderingen in de scheepvaart hebben waarschijnlijk ook effect op de sedimenthuishouding van de kribvakken (mondelijke mededeling Henk Eerden).



*Figuur 5. De cumulatieve erosie van zand uit kribvakken langs de Waal, per jaar, geschat op basis van de monitoring van de bodemligging van 23 kribvakstranden gedurende de periode 1995-1998.*

### 2.1.7. Invloed verlaging kribben

Bovenstaande beschrijvingen en de resultaten van metingen zijn gebaseerd op de hoogtes van kribben langs de Waal vóór de grootschalige verlaging van kribben in het kader van het programma Ruimte voor de Rivier. Inmiddels zijn de kribben in de Midden-Waal en Beneden-Waal met 1 tot 2 meter verlaagd. Verwacht werd dat de bodemligging van de stranden tussen de kribben en de bodemligging van het zomerbed (inclusief de ontgrondingskuilen) zich hierop zouden aanpassen: een aanpassing naar lagere stranden, ondiepere ontgrondingskuilen en een iets hogere ligging van het zomerbed. De morfologische effecten zijn door Arcadis gemonitord (Arcadis 16a-b).

De monitoring liet zien dat de morfologische effecten ten gevolge van de kribverlaging in lijn zijn met de theoretische verwachting. Vooral in de verondieping van de ontgrondingskuilen was het morfologische effect van de kribverlaging goed zien. Ook het ontstaan van een sedimentfront in het zomerbed ter hoogte van de verlaagde kribben sloot aan bij de verwachtingen. De metingen lieten

echter geen duidelijke verandering in de bodemligging van de kribvakstranden na de kribverlaging zien.

Uit de monitoring, die voor de kribvakstranden uit 6 hoogteopnames in de periode 2010 t/m 2015 bestond, bleek dat de bodemligging binnen een kribvak en tussen kribvakken onderling sterk varieert, en dat deze bodemligging ook in de tijd sterk kan variëren. Het bleek lastig om bodemveranderingen als gevolg van kribverlaging in een kribvak te onderscheiden van mogelijke meetartefacten en de natuurlijke dynamiek van het riviersysteem. Ook uit karakteristieke dwarsprofielen bleek geen aanmerkelijk lagere ligging van de kribvakstranden tussen verlaagde kribben in vergelijking met niet-verlaagde kribben.

Direct na kribverlaging bleken de ontgrondingskuilen van verlaagde kribben sterk te verondiepen in vergelijking met de ontgrondingskuilen van de niet-verlaagde kribben. Het verschil bedroeg ca. 0,5 m. De ontgrondingskuilen bleven na de initiële aanzanding vervolgens ondieper dan de kuilen van de niet-verlaagde kribben. De dynamiek van ontgrondingskuilen op de linkeroever (zuidoever) is iets hoger dan die op de rechteroever (noordoever). Dit geldt voor zowel verlaagde als niet-verlaagde kribben. Dit is waarschijnlijk een effect van de scheepvaart.

De morfologische effecten in het zomerbed door de kribverlaging in de Waal zijn nog in ontwikkeling. Deze zullen pas na meerdere decennia zijn ontwikkeld en gedempt. Daarnaast gaan deze effecten samen met morfologische effecten van andere maatregelen zoals aanleg van langsdammen bij Tiel en het gereedkomen van uiterwaardmaatregelen zoals nevengeulen.

## 2.2. Onderzoeksvragen

Er zijn nog veel vragen hoe met de suppletie van kribvakken en het benutten van de stroming en golven van passerende schepen het best een 'zandmotor' voor de rivier kan worden gerealiseerd. Deze pilot is daarom mede bedoeld om hier meer kennis over te ontwikkelen. Het overzicht van onderstaande onderzoeksvragen geeft aan waar de kennisontwikkeling zich op zou moeten richten.

De onderzoeksvragen die gericht op de pilot kribvaksuppletie kunnen worden gedefinieerd, komen voort uit de doelstelling van deze pilot. De hoofddoelstelling is de ontwikkeling van kennis ten aanzien van de mogelijkheden om suppleties van kribvakken met zand en grind zo uit te voeren dat deze als 'zandmotor' voor de rivier gaan fungeren en daarmee de erosie (daling) van het zomerbed van de rivier kan worden afgeremd en (als bijkomend doel) de natuurkwaliteit van de oeverzone door zandaanvoer<sup>3</sup> kan worden versterkt. Aan deze hoofddoelstelling zijn subdoelen verbonden met onderzoeksvragen die ook moeten worden beantwoord: een duurzame uitvoering tegen beperkte kosten, met een geringe belasting van het milieu en geen onaanvaardbare gevolgen voor de waterveiligheid.

### 2.2.1. Veranderingen t.a.v. de kennis van 25 jaar geleden

#### **A. Wat is er veranderd in de scheepvaart op de Waal waar bij de interpretatie van informatie uit het verleden rekening mee moet worden gehouden?**

- ⇒ Hoe is de frequentieverdeling van scheepspassages op de Waal (aantal passages per jaar, verschuiving van kleine naar grote schepen) in de afgelopen 20 jaar veranderd? En hoe zijn de samenstelling van de hele vloot, de scheepsafmetingen en het voortstuwingsvermogen per eenheid veranderd? In de jaren '90 van de vorige eeuw bleken vooral de passages van de grotere motorschepen (Kanaal- en Rijnschepen) bij te dragen aan de erosie van zand uit de

---

<sup>3</sup> Tijdens het opstellen van deze notitie is in overleg met ecologen bij Rijkswaterstaat geconcludeerd dat zandaanvoer naar de oeverzone weinig meerwaarde voor de ecologie heeft en de suppletie daar niet mede op gericht zal zijn.

kribvakken<sup>4</sup>. Is het aantal passages van deze schepen, en die van de duwvaart, en zijn de afmetingen en het voortstuwingsvermogen van de grote schepen sindsdien dusdanig veranderd dat een ander effect van de scheepvaart op de morfologische processen in de kribvakken mag worden verwacht vergeleken met de situatie aan het eind van de vorige eeuw?

**B. Wat is er veranderd in de eigenschappen van processen en het beheer van de Waal waar bij de interpretatie van informatie uit het verleden rekening mee moet worden gehouden?**

- ⇒ De introductie van prestatiecontracten voor onderhoudsbaggerwerk heeft geleid tot veranderingen in de manier van baggeren en storten. De invloed hiervan op de kribvakken is onbekend, en mogelijk gering. De aanleg van een groot aantal Ruimte voor de Rivier projecten heeft invloed op de sedimenthuishouding in zomerbed en kribvakken. De effecten hiervan zijn nog in ontwikkeling; de rivier is in transitie. De gemiddelde afvoeren en piekafvoeren in de periode voorafgaande aan de studies 25 jaar geleden waren hoger dan de opgetreden afvoeren in de jaren erna tot heden. Er was dus mogelijk sprake van een ander regime met meer 'natuurlijke' dynamiek. Deze ontwikkelingen kunnen er onder meer toe hebben geleid dat de korrelgrootte van het sediment in de kribvakken nu anders is dan destijds. Daarnaast is de korrelgrootte van de toplaag van de bodem van het zomerbed van de Waal, volgens analyses van recente monsters, grover dan de situatie van enkele tientallen jaren geleden (ongepubliceerde gegevens).

**C. Betekent de verlaging van een deel van de kribben langs de Waal dat informatie uit het verleden niet langer op de huidige situatie van toepassing is?**

- ⇒ De kennis ten aanzien van de water- en sedimentbeweging in kribvakken, en het effect van passerende schepen hierop, dateert uit een periode met, voor een deel van de Waal, hogere kribben dan nu. Wat is het effect van de verlaging van een deel van de kribben op de sterkte van de stroming van wervels (inclusief effect scheepvaart) en de sedimenthuishouding van de kribvakken?

### 2.2.2. Proceskennis

**D. Bepaalt de zuiging door passerende grote schepen nog steeds de erosie van kribvakstranden, met het grootste effect langs rechte trajecten aan de zuidoever van de Waal?**

- ⇒ De hoofdconclusie uit onderzoek naar de sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal in het verleden is dat de zuiging door passerende grote schepen (voor het grootste deel) de erosie van kribvakstranden bepaalt, en dat dit effect het grootst is in kribvakken langs rechte trajecten aan de zuidoever van de Waal. Inmiddels is de situatie van de kribvakken langs de Waal veranderd (zie bovenstaande vragen). Wat betekenen deze veranderingen voor de hoofdconclusie uit het verleden: geldt die hoofdconclusie nog steeds of is er aanleiding die conclusie te nuanceren? In aanvulling hierop is ook de vraag interessant in hoeverre met de aanpassing van vaarroutes de werking van de zandmotor van kribvaksuppleties kan worden beïnvloed.

**E. Wat is de optimale korrelgrootteverdeling voor een zo goed mogelijk functionerende strategie van kribvaksuppleties als zandmotor van de rivier?**

- ⇒ Met de suppletie in kribvakken moet worden bereikt dat het gesuppleerde sediment relatief snel erodeert en aan het zomerbed van de Waal wordt toegeleverd. Dit pleit voor relatief fijn

---

<sup>4</sup> Het effect van de passage van een duwstel (duwvaart) is weliswaar groter dan het effect van een groot motorschip, maar het aantal passages van motorschepen was destijds veel groter dan het aantal passages van duwvaart.

materiaal dat bij een relatief lage schuifspanning in beweging komt. Anderzijds moet ook worden bereikt dat het geërodeerde materiaal bijdraagt aan het afremmen van de erosie van het zomerbed. Dit pleit voor relatief grof materiaal. Hier zit een spanningsveld: fijn zand erodeert gemakkelijk uit de kribvakken maar draagt waarschijnlijk niet bij aan het afremmen van de erosie van het zomerbed of kan zelfs leiden tot versnelling van erosie van een grove bedding; grof zand (of zelfs grind) draagt waarschijnlijk wel bij aan het afremmen van de erosie van het zomerbed maar komt mogelijk niet of nauwelijks in beweging vanuit de kribvakken. Wat is de optimale korrelgrootteverdeling voor een zo goed mogelijk functionerende strategie van kribvaksuppleties als zandmotor van de rivier? Hoe varieert deze optimale korrelgrootteverdeling in de lengterichting van de rivier over het traject dat in beeld is als locatie voor kribvaksuppleties? Hoe breed mag de korrelgrootteverdeling zijn om de situatie te vermijden dat de fijne fracties wel eroderen (of door de wind verstuiven) en de grove fracties niet, zodat afpleistering optreedt en gesuppleerd sediment niet langer erodeert?

**F. Bij welke waterstand is het effect van scheepvaart op de erosie van sediment uit de kribvakken het grootst?**

- ⇒ Het zandverlies uit kribvakken door scheepvaart is in de jaren '90 van de vorige eeuw alleen gemeten bij constante, lage afvoer. Verwacht mag worden dat dit zandverlies per eenheid van tijd (of reeks scheepspassages) afneemt als de afvoer (waterstand) toeneemt: de invloed van de zuiging door passerende schepen neemt dan af. Hoe verloopt dit zandverlies met een stijging van de afvoer (waterstand)? Bij welke bandbreedte van de afvoer (waterstand) is het effect van scheepvaart op de erosie van sediment uit de kribvakken het grootst?

**G. In welk deel van het kribvakstrand is het effect van scheepvaart op de erosie van sediment uit de kribvakken het grootst?**

- ⇒ Voor welk deel van het talud van kribvakstranden is de kans het grootst dat relatief grof sediment in beweging komt en met de neerstroming uit het kribvak wordt gevoerd? Deze vraag betreft zowel de oriëntatie tussen de kribben als de positie loodrecht op de oever.

**H. Leidt een extra grote suppletie (veel meer dan bij een hoogwater wordt aangevoerd) ook tot een extra snelle erosie van gesuppleerd materiaal?**

- ⇒ De omvang van het totale volume zand en grind dat Rijkswaterstaat in de kribvakken wil suppleren, is groot ten opzichte van de hoeveelheid zand en grind die bij een hoogwater in een kribvak wordt afgezet en de maanden daarna erodeert. Als je veel meer suppleert dan deze natuurlijke variatie, breng je de bodem in het kribvak als het ware veel verder van het dynamische 'evenwicht' van de bodemligging. De vraag is of dit kan leiden tot versnelde erosie, waarbij veel sediment in korte tijd de rivier in stroomt, of juist tot weinig erosie doordat de bodemligging na suppletie zo hoog komt te liggen ten opzichte van de waterlijn dat het materiaal voor een groot deel buiten bereik komt van de stroming en golven door passerende schepen.

**I. In welke mate verstoort de suppletie het bodemleven in een kribvak, en hoe snel treedt herstel op?**

- ⇒ De suppletie zal het aanwezige bodemleven (zoetwatermosselen, rombout- en priklarven) doden. Een belangrijke onderzoeksvraag is hoe snel dat bodemleven zich weer herstelt na de ingreep.

### 2.2.3. Effectiviteit ingreep

**J. Wat is de invloed van de kribvaksuppletie op de bodemligging en het vaargeulonderhoud van**



### **het zomerbed in de nabijheid van deze kribvakken?**

- ⇒ Het hoofddoel van de kribvaksuppletie is het afremmen van de langjarige daling van de bodemligging van het zomerbed zonder dat dit leidt tot een toename van de inspanningen (en kosten) van het vaargeulonderhoud. Niet alleen het effect op de bodemligging van het zomerbed, maar ook de snelheid waarmee dit effect na de suppletie kan optreden is relevant.

### **K. Kan de ‘zandmotor op afstand’ functioneren, met erosie en sedimentatie op (verre) afstand van elkaar?**

- ⇒ Hoe zijn de bronnen van sediment (suppleties in kribvakken: de ‘zandmotor’) en de aanzanding (beperking erosie) van het zomerbed ruimtelijk met elkaar verbonden? Stel dat materiaal met dezelfde grofheid als de samenstelling van de toplaag van het zomerbed te grof is om uit een kribvak te eroderen, kan dan met fijner sediment een supplerend effect verder benedenstrooms worden bereikt? De ‘zandmotor’ zou dan kunnen functioneren ‘op afstand’, met erosie en sedimentatie op (verre) afstand van elkaar (al is het effect hiervan op de bodemligging van het zomerbed dan waarschijnlijk niet te meten, doordat het sediment over een groot traject bezinkt). Aan welke oever kan worden gesuppleerd als de erosie niet gelijkmatig over de breedte is verdeeld?

### **L. Hoe kan suppletie het best worden ingezet voor grootschalige erosie, en hoe voor mitigeren van erosie bij rivierverruimende maatregelen?**

- ⇒ Uit berekeningen blijkt dat voor grootschalige erosie (autonome bodemerosie) een diffuse suppletie over het gehele erosietraject nodig is. Dit zou betekenen dat meerdere kleine kribvaksuppleties in plaats van enkele grote suppleties moet worden toegepast. Echter, wanneer benedenstrooms van een nieuw aangelegde maatregel een tijdelijke erosiegolf wordt opgewekt (bijvoorbeeld stroomafwaarts van een nevengeul) kan worden gekozen voor een enkele kribvaksuppletie direct benedenstrooms van de maatregel, aan dezelfde oever. De suppletie wordt gestopt wanneer de aanzandingsgolf van de maatregel het kribvak heeft bereikt.

## **2.2.4. Beperking risico's uitvoering**

### **M. Hoe groot is het risico dat de ‘zandmotor’ erosie van het zomerbed versterkt?**

- ⇒ De toelevering van zand vanuit de kribvakken hoeft er niet toe te leiden dat de erosie van het zomerbed wordt afgeremd. Een tegengesteld effect is vooralsnog niet uit te sluiten. De toplaag van de bedding van de Waal is grof. Als hier fijner sediment (zand) vanuit de kribvakken naar toe wordt gevoerd kan dat fijnere sediment de beweeglijkheid van het grovere sediment vergroten. Het fijnere sediment werkt dan als een smeermiddel voor de verplaatsing van het grovere sediment; hierdoor zou de erosie van het zomerbed juist kunnen toenemen. Onder welke omstandigheden kan deze situatie zich in de Waal voordoen en met welk ontwerp van de kribvaksuppletie kan de kans hierop zoveel mogelijk worden beperkt?

### **N. Met welke maatregelen kan de rivierbeheerder de erosie van gesuppleerd sediment uit kribvakken bijsturen?**

- ⇒ Voor de rivierbeheerder is de realisatie van kribvaksuppleties als ‘zandmotor’ van de rivier geslaagd als ongeveer 80% van het gesuppleerde sediment over een periode van een paar jaar bijdraagt aan het zomerbed. Er zijn heel veel factoren die de erosie van sediment uit kribvakken mede bepalen, en deze factoren zijn voor geen van de kribvakken hetzelfde. Daarmee kan op voorhand niet worden gezegd hoeveel gesuppleerd sediment in een

bepaald kribvak binnen een paar jaar wordt geërodeerd. Als deze erosie minder blijkt dan beoogd, kan het gewenst zijn die erosie met maatregelen te vergroten. Met welke maatregelen kan de beheerder de erosie bijsturen?

**O. Hoe groot is de kans dat gesuppleerd sediment in zeer korte tijd in grote hoeveelheden in de vaargeul komt en daar ondiepten veroorzaakt?**

⇒ Het is niet gewenst dat de erosie van de suppletie zo snel verloopt dat dit tot ondieptes op de vaargeul leidt. De kans hierop is klein: het gaat om vrij kleine hoeveelheden sediment (ten opzichte van de hoeveelheid sediment die zich over het zomerbed verplaatst) die eenmaal in de rivier niet op één plek in de vaargeul terecht zal komen.

**P. Hoe kun je de suppletie ‘no-regret’ ontwerpen?**

⇒ Met welk ontwerp van een kribvaksuppletie kan het best worden bereikt dat als de beoogde erosie van het gesuppleerde materiaal niet plaats blijkt te vinden, de suppletie ongedaan kan worden gemaakt (en het materiaal in principe weer uit het kribvak kan worden verwijderd)?

**Q. Moet het suppletie-ontwerp met het oog op de hoogwaterveiligheid aan bepaalde randvoorwaarden voldoen?**

⇒ Ingrepen in de rivier mogen in principe geen negatieve effecten hebben op de hoogwaterveiligheid. De hoogte van het strand tussen de kribben heeft invloed op de afvoer en het verval over de kribben, en daarmee op de waterstand bij hoge afvoeren. Als een suppletie er toe leidt dat het hoogteverschil tussen strand en kribben minder wordt, kan de waterstroming door de suppletie wellicht beter over de kribben worden geleid waardoor de kribben minder weerstand voor het stromende water opleveren en de suppletie (tijdelijk) in positieve zin bijdraagt aan de waterveiligheid.

**R. Hoe kan de suppletie het best (duurzaam) worden uitgevoerd, met de minste belasting voor het milieu (uitstoot N en CO<sub>2</sub>, troebelheid)?**

⇒ De kribvaksuppletie is een pilot waarin onderzocht zal worden of en (zo ja) hoe het suppleren van kribvakstranden onderdeel kan zijn van een duurzaam beheer van de vaarweg van de Rijntakken. Dit betekent dat ook de uitvoering van de suppletie het milieu zo min mogelijk moet belasten.

**S. Wat is de invloed van de kribvaksuppletie op de ecologie (bodemleven) in het kribvak?**

⇒ Het suppleren kan een (negatief) effect hebben op de ecologie, met name het bodemleven, in het kribvak. Het aanwezige bodemleven wordt bedekt onder een behoorlijk dikke laag zand/grind. Bovendien zal de korrelgrootteverdeling van de nieuwe laag anders zijn dan die van de laag die er al lag. Het bodemleven zal zich aan de veranderingen moeten aanpassen. De vraag is of en (zo ja) hoe snel dit zal lukken. De ecologie van kribvakken is mogelijk minder relevant voor hoog-dynamische vakken, bijvoorbeeld langs de zuidoever van de Waal, of in buitenbochten.

## 2.3. Schets van mogelijke maatregelen

Met ‘schets van mogelijke maatregelen’ wordt bedoeld: een schets van mogelijke scenario’s voor de realisatie van de kribvaksuppletie. Rijkswaterstaat wil een bepaalde hoeveelheid zand/grind in kribvakken suppleren. Hoe kan dit het best worden uitgevoerd zodat

- een zo groot mogelijk deel (streven: 80%) van het gesuppleerde zand/grind binnen een paar jaar weer uit de kribvakken erodeert,
- dit geërodeerde materiaal grotendeels aan het zomerbed van de rivier wordt toegeleverd

- (een klein deel mag zich verplaatsen langs de oeverzone, met name richting de oeverwallen),
- dit geërodeerde materiaal op het zomerbed bijdraagt aan de beperking van de daling van het zomerbed (stabilisatie),
- dit geërodeerde materiaal niet leidt tot het ontstaan van lokale ondieptes in de vaargeul die hinder opleveren voor de scheepvaart,
- negatieve gevolgen voor milieu en waterveiligheid minimaal zijn, en
- de uitvoering duurzaam en tegen acceptabele kosten kan worden uitgevoerd?

### 2.3.1. De omvang van de ingreep

Het totale suppletievolume bedraagt waarschijnlijk (afhankelijk van de kosten) ongeveer 40.000 m<sup>3</sup> (ter vergelijking: het langjarig transport van zand en grind in de Bovenrijn in de periode 1991-2010 was ongeveer 400.000 m<sup>3</sup>/jaar, waarvan 86% de Waal in werd getransporteerd (Frings et al., 2019)). Rijkswaterstaat heeft een selectie gemaakt van potentieel geschikte kribvakken en verkend hoeveel zand/grind in deze vakken kan worden gestort: de stortruimte in deze vakken varieert tussen de 2600 en 18.000 m<sup>3</sup> per kribvak, en bedraagt gemiddeld ongeveer 5000 m<sup>3</sup>.

We krijgen een beeld van de betekenis van de omvang van deze getallen door getallen uit een studie van 25 jaar geleden er bij te pakken toen de bodemligging van de stranden van 23 kribvakken langs de Waal 4 jaar lang is gemonitord (opnames op 7 tijdstippen). In deze tijdreeks zijn twee periodes in het bijzonder relevant voor het doel van deze notitie: een periode voor en na een hoge afvoer op de Waal, waarin veel zand in de kribvakken werd afgezet, en een periode na een hoogwater waarin een 'vol' kribvak is gaan eroderen. Tijdens de hoge afvoer (die van 1998) werd in de 23 kribvakken gemiddeld 750 m<sup>3</sup> zand in een kribvak afgezet. In de eerste 4 maanden na een hoogwater (die van 1995) werd gemiddeld ruim 220 m<sup>3</sup> zand uit een kribvak geërodeerd. De totale aanvoer van zand naar de kribvakken langs de Waal tijdens de hoge afvoer van 1998 bedroeg gemiddeld 370.000 m<sup>3</sup>; dit zand werd afgezet in 800 kribvakken<sup>5</sup> (Ten Brinke, 2003).

Deze getallen illustreren de uitdaging: de natuurlijke dynamiek per kribvak is, in kubieke meters per tijdseenheid, veel minder dan de hoeveelheid zand/grind die Rijkswaterstaat in kribvakken wil suppleren en wil laten eroderen. Ten minste, als we er van uitgaan dat Rijkswaterstaat het aantal kribvakken voor de suppletie wil beperken (niet vele tientallen vakken). De 'natuurlijke' dynamiek van aanzanding (in 1 hoogwater) en erosie van kribvakstranden (in 4 maanden na hoogwater) bedroeg destijds orde 1 decimeter verhoging/verlaging van het strandoppervlak (in het morfologisch actieve deel). Voor de suppletie moeten we dus uitgaan van vele decimeters storten willen we 40.000 m<sup>3</sup> zand/grind kwijt kunnen in een beheersbaar aantal vakken. Het gaat dus om een forse ingreep per kribvak.

### 2.3.2. Keuzeopties scenario's

#### Traject in de Waal: Samenstelling te suppleren materiaal

De bodemligging van de Waal (Boven- en Midden-Waal) daalt over het hele traject van de rivier. De korrelgrootte van de toplaag van de bedding verloopt van grind bovenstrooms naar zand benedenstrooms. Als het doel is met kribvaksuppleties de daling van het nabijgelegen zomerbed af te remmen, mag de korrelgrootte van het materiaal dat vanuit de kribvakken naar de hoofdgeul wordt gevoerd niet al te veel afwijken van de samenstelling van de toplaag van het zomerbed ter plaatse (anders blijft het niet op de bedding liggen of is er een risico dat de grove toplaag na

---

<sup>5</sup> Het zand dat tijdens een hoogwater in de kribvakken wordt afgezet, erodeert in de daaropvolgende jaren weer, met name door de golven en stroming die passerende schepen opwekken (Ten Brinke, 2003).

bijmenging met fijner sediment gemakkelijker erodeert). De korrelgrootte van het te suppleren materiaal zal voor een locatie in de Boven-Waal in principe dus grover zijn dan voor een locatie in de Midden-Waal.

### **Locatie in de Waal**

De schuifspanning door het stromende water en de golven in kribvakken varieert sterk tussen vakken aan de noord- en de zuidoever, langs rechte trajecten en in bochten, en in binnen- en buitenbochten. De uitdaging is fors: er moet in korte tijd (een paar jaar) veel gesuppleerd sediment vanuit kribvakken in beweging komen en dit sediment moet bij voorkeur relatief grof zijn (het oorspronkelijke materiaal in het kribvak is over het algemeen fijner dan het materiaal in de hoofdgeul). Daarom moeten bij voorkeur kribvakken worden geselecteerd waar de combinatie van rivierstroming en waterbeweging door passerende schepen tot relatief grote schuifspanningen boven gesuppleerde kribvakstranden leidt. Dit zijn vooral kribvakken aan de zuidoever (effect beladen vaart naar Duitsland) en in buitenbochten (sterke stroming en (mogelijk) effect schroefstraal schepen).

Bij de selectie van kribvakken wordt aanbevolen niet te suppleren direct bovenstrooms van haveningangen en inlaten van nevengeulen, en locaties met Minst Gepeilde Dieptes (MGD) (die relevant zijn voor de scheepvaart bij lage afvoeren). Daarnaast is het belangrijk dat de kribvakken zijn gelegen op trajecten waar (traject-)gemiddeld bodemerosie optreedt zodat de suppletie bijdraagt aan het remmen van deze erosie.

### **Locatie in het kribvak (en vorm suppletie)**

De vorm van de suppletie in een kribvak wordt bepaald door de oriëntatie tussen de kribben (horizontaal) en ten opzichte van de oever (vertikaal).

#### **⇒ Horizontaal**

Met modelberekeningen is verkend welke locaties in het kribvak zich het beste lenen voor een suppletie als voeding voor een 'zandmotor': het bovenstroomse deel, het benedenstroomse deel of het centrale deel van een kribvak (Kok, 2020). Het centrale deel bleek het meest effectief: stroming en golven van passerende schepen grijpen dan het best aan op de suppletie en de neerstroming is dan het meest effectief in het transporteren van opgewerveld sediment naar de vaargeul.

#### **⇒ Vertikaal**

In 1989 is een suppletie uitgevoerd van kribvakken langs de Waal bij Ewijk (Duijn, 1996). De suppletie is uitgevoerd met zand over het hele profiel van het kribvak; het profiel werd met ongeveer 2 meter opgehoogd met het doel de achterliggende oever te stabiliseren. Na 1 jaar bleken de grootste veranderingen te zijn opgetreden in de zone tussen 0 en 3 meter onder de gemiddelde rivierwaterstand. Na ruim 5 jaar bleek erosie te zijn opgetreden over het hele kribvakprofiel boven het niveau van 3 meter onder de gemiddelde rivierwaterstand; de erosie was het grootst in de zone rond de gemiddelde rivierwaterstand (Duijn, 1996, in: Sieben, 2006).

Deze bevindingen sluiten aan bij het onderzoek van Ten Brinke (2003). Zand en grind dat te hoog op de oever ligt, ligt te vaak buiten het bereik van stroming en golven. Zand en grind dat te diep op het onderwatertalud van het kribvakstrand ligt, ligt buiten het bereik van de schuifspanning van golven en de zuigende werking van passerende schepen.

### **Moment van suppleren**

Bij hoge waterstanden ligt het gesuppleerde materiaal buiten het bereik van de schuifspanning van golven en de zuigende werking van passerende schepen. Bij zeer lage waterstanden dringen golven en stroming slechts een klein deel van het kribvak binnen. Het verloop van de waterstanden op de rivier in de jaren na de suppletie bepaalt dus in grote mate het verloop van de ingreep.

Uiteraard heb je geen invloed op dit verloop van waterstanden. Wel kun je er voor zorgen dat niet

wordt gesuppleerd kort na een hoogwater. De kribvakstranden zullen dan door de rivier al fors zijn aangezand waardoor de ruimte voor een suppletie beperkt is. Een suppletie zou dan tot een dermate hoog strandoppervlak kunnen leiden dat stroming en golven hier weinig grip op krijgen.

### **Volume suppletie**

Er zitten grenzen aan het volume van een suppletie waarbij deze nog effectief als zandmotor functioneert. Bij een te groot volume komt een deel van de suppletie terecht op locaties in het kribvak waar stroming en golven niet (lang genoeg) voldoende sterk zijn om tot voldoende erosie te leiden, of wordt tot een te hoge bodemligging van het kribvakstrand gesuppleerd (zie ook de kennisvraag hierover bij sectie 1.2.2).

Voorkomen moet worden dat gesuppleerd materiaal onder een te hoge helling aan de kant van de rivier komt te liggen waardoor het materiaal naar het zomerbed kan afglijden ('avalanching' of 'slumping'), al wordt de kans hierop niet zo groot geacht.

### **Wijze van suppleren**

Er zijn verschillende scenario's denkbaar voor de wijze van suppleren. Het licht voor de hand dit per schip te doen (en niet per vrachtwagen), maar ook dan zijn er nog verschillende scenario's denkbaar: storten, pompen, rainbowen, of met gebruik van een perskade. Welk scenario het meest geschikt is hangt onder meer af van de vormgeving van de suppletie (zie hierboven), de herkomst van het te suppleren materiaal en de beperking van het risico van negatieve effecten op de ecologie<sup>6</sup>.

### **Inzet van harde constructies**

De erosie van het gesuppleerde materiaal kan worden beïnvloed door inzet van kleinschalige 'harde' maatregelen die de stroomaanval en de erosie versterken (zoals bodemschermen) of die plaatselijk de erosie beperken (zoals grindpakket) om de erosie beheersbaar te houden of het gesuppleerde materiaal tijdens de uitvoering van de suppletie in het kribvak te houden.

### **Suppleren voor het zomerbed versus suppleren voor natuurontwikkeling**

Bij de onderzoeksvragen t.a.v. de processen (2.2.2) is de vraag gesteld hoe breed de korrelgrootteverdeling van het te suppleren materiaal mag zijn om de situatie te vermijden dat de fijne fracties wel eroderen (of door de wind verstuiven) en de grove fracties niet, zodat afpleistering optreedt en gesuppleerd sediment niet langer erodeert. Deze vraag is niet alleen relevant met het oog op de erosie door golven en stroming van passerende schepen, maar ook in relatie tot de (oorspronkelijke) combinatie van de twee doelstellingen van de suppletie: de hoofddoelstelling van het afremmen van de erosie van het zomerbed en de nevensdoelstelling van het leveren van een bijdrage aan natuurontwikkeling.

Voor de hoofddoelstelling is relatief grof sediment nodig, voor de nevensdoelstelling fijn zand dat kan verstuiven. Stop je dat bij elkaar in één suppletie dan stopt de verstuiving zodra de toplaag is afgepleisterd. En als die toplaag dan te grof is voor de golven en stroming van passerende schepen, zou ook de toevoer naar het zomerbed beperkt kunnen worden. Voor een goed resultaat met betrekking tot beide doelstellingen is het waarschijnlijk noodzakelijk twee verschillende typen suppleties te ontwerpen: een voor het zomerbed (met grof sediment) en een voor de natuur (met fijn zand). Die suppleties zou je dan in verschillende vakken kunnen uitvoeren of op verschillende plekken in hetzelfde vak (grof sediment dicht bij de waterlijn, fijn zand hoog in het kribvak tegen de vegetatielijn).

In overleg met ecologen bij Rijkswaterstaat is geconcludeerd dat de meerwaarde van de kribvaksuppletie voor de ecologie niet zit in een eventuele toename van verstuiving van zand naar kribvakken en uiterwaarden. Die verstuiving vindt vooral plaats in binnenbochten, maar die locaties

---

<sup>6</sup> Ook aspecten van de vergunningverlening zullen een rol spelen. Wij laten die hier buiten beschouwing.

zijn niet interessant voor deze pilot. Meerwaarde voor de ecologie kan wellicht wel worden bereikt via het ontwerp van de suppletie: (1) relatief grof materiaal in de suppletie is interessant voor vis (paaieren); (2) landwaarts van de suppletie kun je een gebied met (een deel van het jaar) ondiep water creëren dat door zijn warmte aantrekkelijk kan zijn voor jonge vis.

## 2.4. Programma van eisen

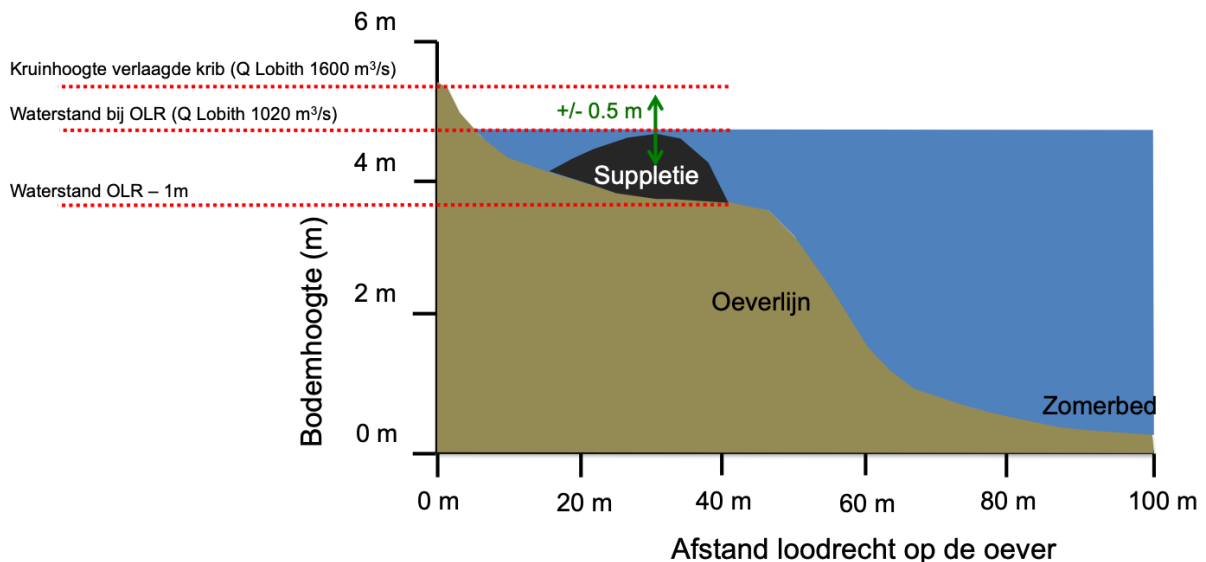
- Als vuistregel stellen wij voor: Selecteer 40% van het voor de suppletie benodigde aantal kribvakken in rechte trajecten aan de zuidoever of in de overgangen (rechtstanden) van binnen- en buitenbochten, en 40% in buitenbochten. Selecteer ook 20% van de kribvakken in rechte trajecten aan de noordoever (voor vergelijking minder effect erosie/suppletie noordoever: het is een kennispilot!). Selecteer geen kribvakken in binnenbochten.
- Suppleer kribvakken op trajecten waar (traject-)gemiddeld bodemerosie optreedt zodat de suppletie bijdraagt aan het remmen van deze erosie. Kijk bij voorkeur naar het traject van de Waal met verlaagde kribben omdat daar de kribvakstranden relatief laag liggen (veel ruimte om te suppleren) en de dynamiek van de waterbeweging van passerende schepen waarschijnlijk voldoende groot zal zijn. Deze verlaagde kribben staan onder water vanaf een Rijnafoer bij Lobith van ongeveer 1600 m<sup>3</sup>/s (ongeveer 65% van de tijd). Kies de locaties van de kribvakken bij voorkeur relatief dicht bij elkaar (met het oog op efficiëntie suppleren en monitoren)
- Suppleer relatief grote volumes per kribvak zodat je duidelijk effecten kunt monitoren en voor de gehele pilot niet al teveel kribvakken nodig hebt (efficiëntie). Onder relatief groot verstaan wij 3000 tot 4000 m<sup>3</sup> voor kribvakken langs rechte trajecten van de Waal, en wellicht een paar duizend m<sup>3</sup> meer in buitenbochten<sup>7</sup>.
- Suppleer niet direct bovenstrooms van haveningangen, invaarten van kanalen en inlaten van nevengeulen, en locaties met Minst Gepeilde Dieptes (MGD).
- Selecteer (indien mogelijk) altijd een combinatie van 5 kribvakken naast elkaar. In het meest bovenstroomse kribvak wordt niet gesuppleerd; dit is de referentie. In de 4 benedenstroomse vakken wordt gesuppleerd. Voorwaarde is dat de kribvakken gelijkwaardig zijn in vorm en ligging; met name de afstand tussen de kribben en de oriëntatie van de kribben t.o.v. de rivier moeten vergelijkbaar zijn.
- Suppleer in de kribvakken in de rechte riviertrajecten (dus de vakken die niet in de buitenbochten liggen) op het lage (veelal onderwater) deel van het kribvakstrand, niet op het steile talud naar de bedding en niet te hoog op het strand. Wij stellen voor de suppletie te beginnen waar het strand een meter lager ligt dan de waterstand bij OLR en de suppletie van daaruit over een strook van 20 meter landwaarts uit te voeren. Het hoogteverschil tussen de waterstand bij OLR en de hoogte van de kruin van de verlaagde kribben (die de waterstand 65% van de tijd bereikt of overschrijdt) is iets minder dan 1 meter. Door te beginnen op het strand vanaf 1 meter lager dan de waterstand bij OLR wordt bereikt dat de suppletie (met een laagdikte van 0,5 tot 1,5 meter; zie verderop) niet hoger komt dan de kruin van de verlaagde kribben. (figuur 6). Hierbij geldt wel de kanttekening dat je met de startdiepte van 1 meter onder de waterstand bij OLR op het steile talud naar het zomerbed uit kunt komen (figuur 7); mocht dat het geval zijn, dan moet de suppletie iets verder landwaarts worden uitgevoerd waar het steile talud is overgegaan in het kribvakstrand. Blijf met de suppletie op minimaal 20 meter afstand (in de richting van de oever) van de (denkbeeldige) lijn die de kribbakens met elkaar

---

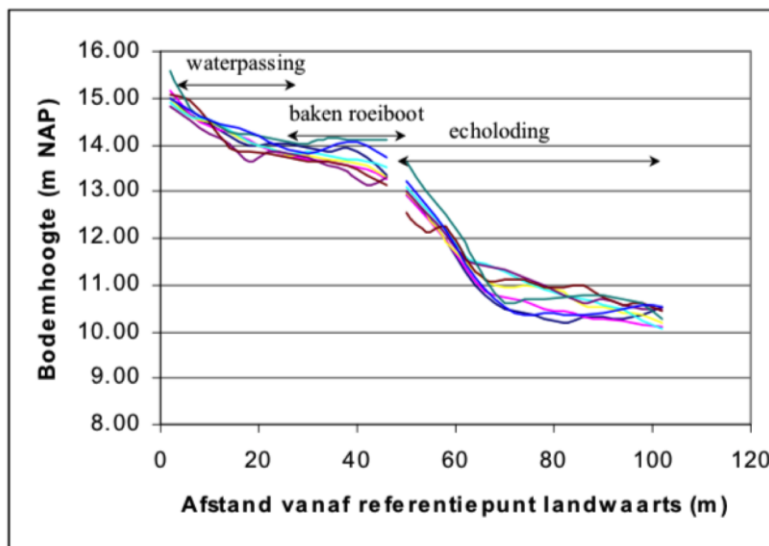
<sup>7</sup> Voor buitenbochten is dit niet exacter in te vullen dan deze schatting omdat je hiervoor de bodemligging van het onderwaterdeel van het kribvakstrand moet kennen, en deze zal van vak tot vak verschillen.

verbindt. Zo blijft de kans klein dat schepen last kunnen hebben van het gesuppleerde materiaal<sup>8</sup>.

- Suppleer in de buitenbocht op het strand vanaf een bodemligging die overeenkomt met de waterstand bij OLR tot een strook van 20 meter landwaarts. Omdat de kribben hier niet verlaagd zijn kan de suppletie hoger op het strand beginnen zonder dat de suppletie hoger uitkomt dan de kruin van de kribben. Het is ook verstandig dit te doen omdat de kans groot is dat een bodemligging op een niveau van 1 meter onder de waterstand bij OLR in de buitenbochten op het steile talud ligt. Blijf ook hier met de suppletie op minimaal 20 meter afstand (in de richting van de oever) van de (denkbeeldige) lijn die de kribbakens met elkaar verbindt.



Figuur 6. Schets van het dwarsprofiel van de te realiseren kribvaksuppletie.



Figuur 7. Bodemligging van een kribvakstrand langs een recht traject van de Waal, van de vegetatielijn (links) tot het zomerbed (rechts) (Bron: Ten Brinke, 2003).

<sup>8</sup> T.a.v. de locatie van de suppletie in het kribvak is het belangrijkste criterium dat niet op het steile talud moet worden gesuppleerd maar altijd op het flauwere kribvakstrand. In de praktijk betekent dit dat je daarmee vrijwel altijd al op meer dan 20 meter uit de bakelijijn blijft.

- Maak voor de vorm van de suppletie een onderscheid in twee ontwerpen, dit met het oog op onderzoek naar ecologische effecten van deze suppleties (figuur 8):
  - ⇒ Ontwerp 1: Suppleer per cluster van kribvakken in het meest stroomafwaarts gelegen kribvak in een recht traject aan de noordoever, een recht traject aan de zuidoever en in een buitenbocht<sup>9</sup> over de gehele afstand tussen de kribben (dan heb je ongeveer 200 meter suppletieruimte). Toepassing van de suppletie over 200 m lengte, tot 1 m hoog en tot 20 m diep het vak in geeft een volume van 4000 m<sup>3</sup>. Dit ontwerp zou dus in totaal voor 3 kribvakken (zie figuur 10) moeten worden uitgevoerd.
  - ⇒ Ontwerp 2: Suppleer in de andere kribvakken over ongeveer driekwart van de afstand tussen de kribben (dan heb je ongeveer 150 meter suppletieruimte). Suppleer daar niet in de 25 meter tot beide kribben, gemeten vanaf de overgang van de kribben naar het strand. Toepassing van de suppletie over 150 m lengte, tot 1 m hoog en tot 20 m diep het vak in geeft een volume van 3000 m<sup>3</sup>.

Het verschil tussen ontwerpen 1 en 2 is de mate waarin de waterbeweging van passerende schepen het water boven het kribvakstrand landwaarts van de suppletie kan beïnvloeden. Ontwerp 2 is waarschijnlijk het meest effectief voor het functioneren van de zandmotor doordat de waterstroming langs de kribben (en dus de neerstroming) niet door de suppletie wordt geblokkeerd. Keerzijde is dat de invloed van golven en stroming landwaarts van de suppletie te groot kan zijn voor, bijvoorbeeld, jonge vis. Ontwerp 1 levert waarschijnlijk meer luwte op in het ondiepe water landwaarts van de suppletie waardoor dit ontwerp mogelijk meerwaarde heeft voor de ecologie. Door beide ontwerpen uit te voeren en te monitoren kan het effect van suppleties op de ecologie worden onderzocht.

- In de praktijk zal het niet uitvoerbaar zijn overal exact een suppletiehoogte van 1 meter te halen. Deze 1 meter is het gemiddelde van de suppletie tussen de kribben; de suppletiehoogte mag variëren tussen 0,5 en 1,5 meter zolang gemiddeld een hoogte van 1 meter wordt gerealiseerd. Met andere woorden: binnen een aangesloten contour in het kribvak wordt een gemiddelde stortlaag van 1 meter aangebracht met een uitvoeringstolerantie van +/- 0,5 m. De suppletie mag geen grotere hoogte bereiken dan de hoogte van de kruin van de naast gelegen kribben; dit komt overeen met een waterstand bij een afvoer op de Bovenrijn bij Lobith van 1600 m<sup>3</sup>/s (deze wordt 65% van de tijd overschreden).
- Suppleer niet in winter en voorjaar maar rond 1 juni. Zo wordt voorkomen dat de geplande suppletie samenvalt met een moment na een recent hoogwater, waardoor de kribvakken relatief hoog kunnen zijn aangezand en de ruimte voor suppleren te beperkt kan zijn.
- Begin (als Rijkswaterstaat) je monitoring van de bodemligging vóór de uitvoering van de eerste suppletie, en monitor het te suppleren kribvak en het referentievak gelijktijdig.

---

<sup>9</sup> Hier sluiten wij al aan bij de uiteindelijke selectie van 3 clusters van kribvakken in figuur 10.





Figuur 8. Schets van de voorgestelde uitvoering van de suppletie van kribvakken, volgens 2 ontwerpen (1) een ontwerp waarbij de suppletie aansluit op beide kribben (boven), en (2) een ontwerp waarbij tussen de suppletie en beide kribben een afstand van 25 m wordt aangehouden (onder). De rode lijn verbindt de bakens op de koppen van de kribben.

- Kies voor het te suppleren materiaal een mengsel van zand en grind: niet te grof grind, niet te fijn zand. Dit is enerzijds het meest praktisch: dit materiaal is waarschijnlijk het meest voorhanden. Anderzijds is dit een veilige keuze: je hebt grind nodig voor de stabilisatie van de bedding, maar zand geeft meer zekerheid dat het erodeert. Een goede richtlijn is: een korrelgrootteverdeling die overeenstemt met de gemiddelde samenstelling van het sediment dat in transport is in het zomerbed op het traject ter hoogte van de pilot en benedenstrooms over een afstand van orde 1 km, waarbij de grofste fractie (grind) niet groter is dan de sedimentdiameter die nog in transport kan komen onder invloed van de scheepsgolven.

In onderstaande tabel is voor trajecten van 5 km vermeld welk gewichtspercentage van de toplaag van het zomerbed zand en grind kleiner dan 4 mm is. Deze getallen zijn berekend op basis van de data van de bemonstering van de toplaag van het zomerbed van de Waal in 2020. Een mengsel van zand en grind tot maximaal 4 mm is fijner dan de samenstelling van de toplaag van het zomerbed maar de afwijking is dermate beperkt dat verwacht mag worden dat dit materiaal na erosie uit de kribvakken deel gaat uitmaken van de bedding zonder de samenstelling en het gedrag van de bedding significant te verstoren. De grens van 4 mm is gekozen omdat de stroming door passerende scheepvaart naar verwachting sterk genoeg is om grind met deze diameter nog te kunnen verplaatsen: bij deze diameter hoort een drempelwaarde voor begin van beweging volgens de Shields curve (voor beweging bij stroming) van ongeveer 3 N/m<sup>2</sup>. Uit metingen in 1996 en 1997 is destijds ingeschat dat deze drempelwaarde periodiek in het water boven het kribvakstrand tijdens passerende schepen wordt overschreden. Het is verstandig geen materiaal te suppleren dat grover is dan 4 mm.

Tabel 1. Het percentage materiaal (in gewicht) kleiner dan 4 mm in monsters van de bovenste 25 cm van het zomerbed van de Waal (opname 2020). De waarden zijn gemiddelden over trajecten van 5 km met 3 monsters per km (in de as en aan de linker en rechter oever).

	Rkm	% Zand en grind < 4mm
Waal	870-875	48
Waal	875-880	54
Waal	880-885	51
Waal	885-890	67
Waal	890-895	70
Waal	895-900	70
Waal	900-905	74
Waal	905-910	78

Uiteindelijk zijn 3 clusters van kribvakken geselecteerd (zie figuur 10). Cluster 1 (bocht bij Gendt) ligt ter hoogte van rivierkm 878. Clusters 2 en 3 (Winssen en Wely) liggen ter hoogte van rivierkm 894-896. Van de hoeveelheid zand en grind  $\leq 4$  mm (en zand fijner dan 250  $\mu$ m buiten beschouwing gelaten) is bij Gendt 31% (qua gewicht) van de toplaag van het zomerbed matig grof zand (250-500  $\mu$ m), 47% grof zand (500-2000  $\mu$ m) en 21% grind (2-4 mm). Bij Winssen en Wely zijn deze percentages respectievelijk 22%, 54% en 24%. Deze verschillen zijn dermate gering dat wij voorstellen voor alle drie de clusters hetzelfde materiaal te suppleren: een mengsel van ongeveer een kwart matig grof zand (250-500  $\mu$ m), de helft grof zand (500-2000  $\mu$ m) en een kwart grind (2-4 mm)<sup>10</sup>.

## 2.5. Voorstel selectie kribvakken

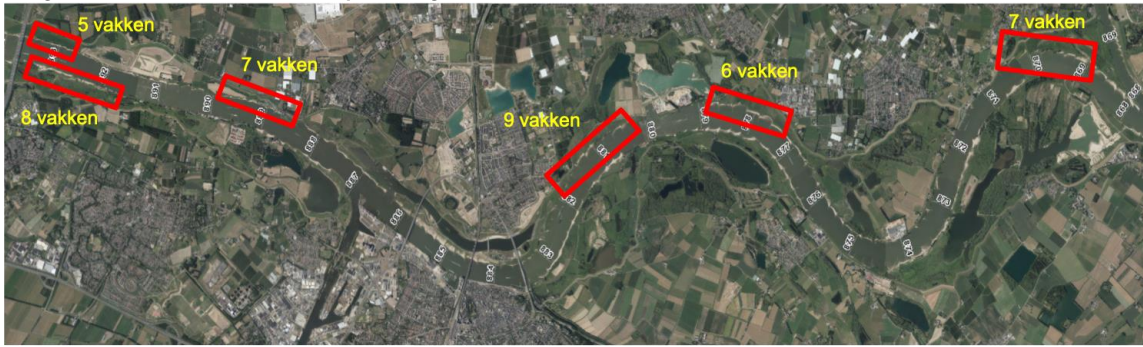
Op basis van bovenstaand programma van eisen kan een voorselectie worden gemaakt van kribvakken die zich wellicht goed lenen voor een suppletie (figuur 9). Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De kribvakken liggen in trajecten van de Waal waar de erosie van het zomerbed de afgelopen jaren relatief groot was: dus bovenstrooms van Tiel;
- De kribvakken liggen deels in buitenbochten en deels langs rechte trajecten met verlaagde kribben;
- Steeds wordt een blok van naast elkaar gelegen kribvakken gekozen zodat efficiënt kan worden gewerkt bij suppletie en monitoring (niet teveel versnippering).

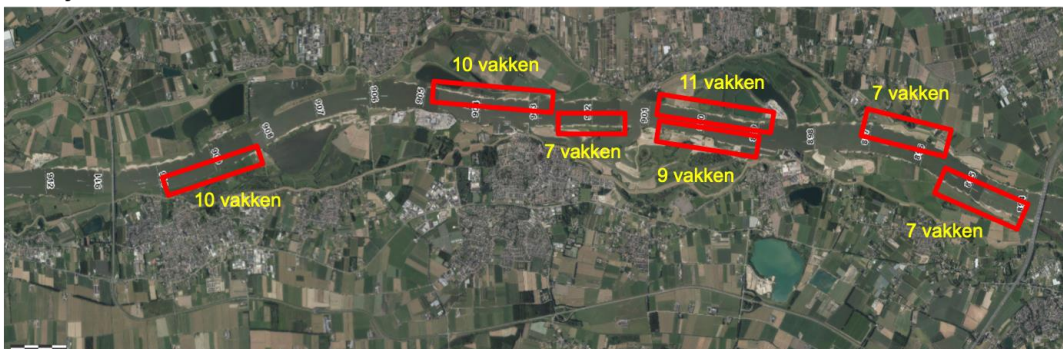
Naar verwachting kan in blokken van ongeveer 4 vakken worden gesuppleerd, waarbij een vijfde vak net bovenstrooms hiervan als referentie dient (geen suppletie, wel monitoring).

<sup>10</sup> Het verschil in grofheid van de toplaag van het zomerbed bij Gendt in vergelijking met Winssen en Wely wordt vooral veroorzaakt door het verschil in percentage grind grover dan 4 mm. Als je alleen de fractie kleiner dan 4 mm beschouwt en dit normaliseert naar 100% vallen de verschillen tussen beide locaties grotendeels weg.

### Traject Pannerdensche Kop - Ewijk

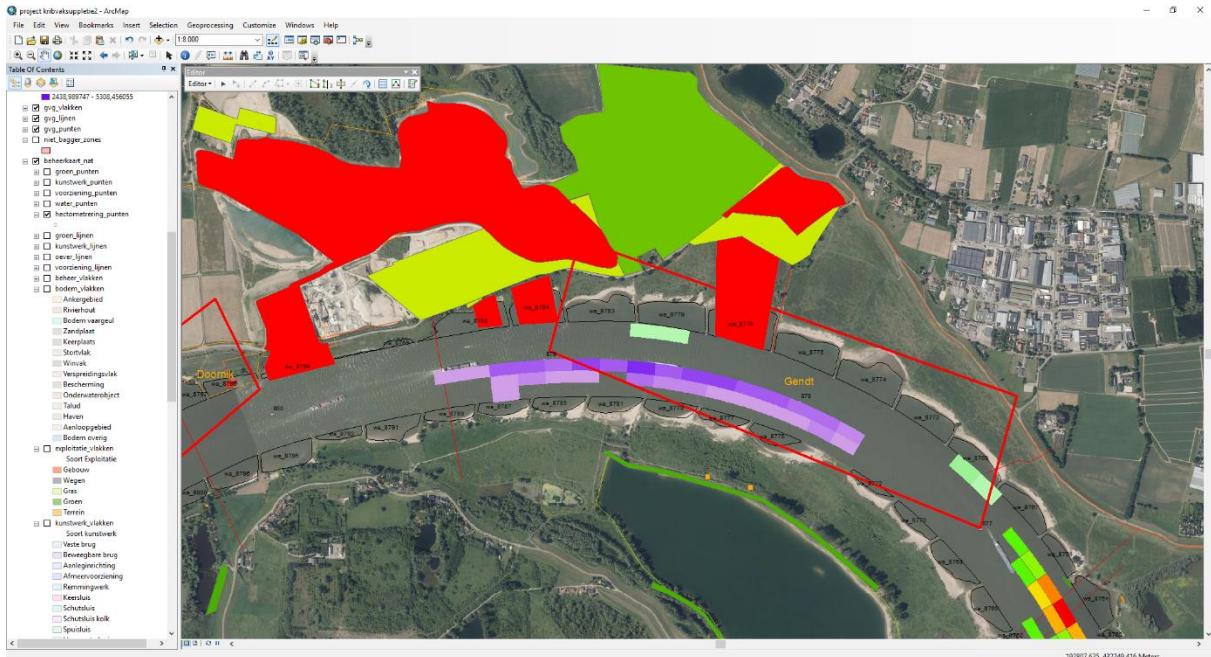


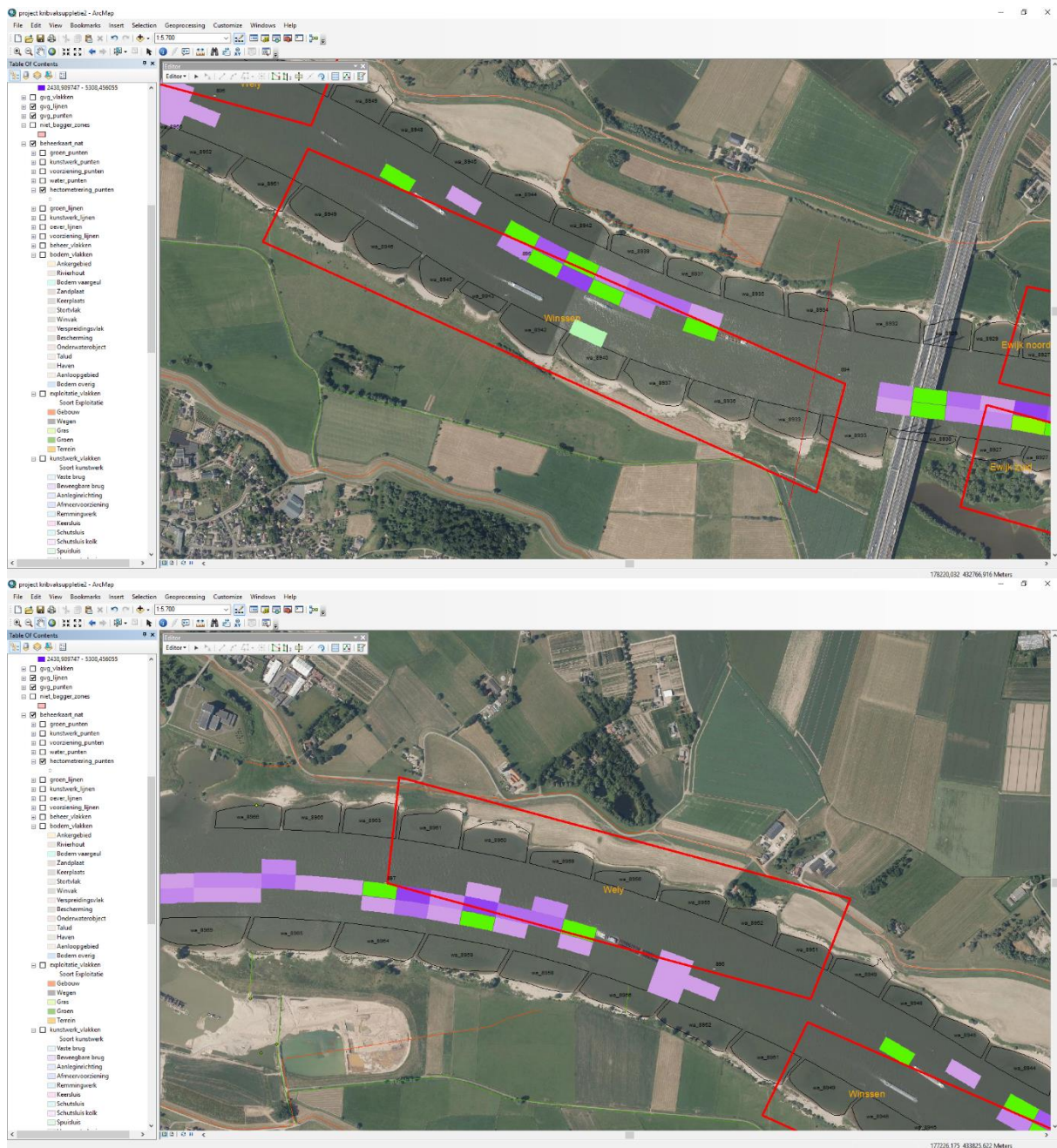
### Traject Ewijk – Beneden Leeuwen



*Figuur 9. Voorselectie van kribvakken die zich goed zouden kunnen lenen voor een suppletie die leidt tot het functioneren van kribvakstranden als ‘zandmotor’ voor de Waal.*

Rijkswaterstaat heeft vervolgens gekeken welke vakken van deze voorselectie zich ook vanuit rivierkundige en beheersredenen goed lenen voor de suppletie. Dat heeft onderstaande 3 clusters van kribvakken opgeleverd (figuur 10).





Figuur 10. Geselecteerde kribvakken voor de uitvoering van de suppletie: boven de bocht bij Gendt (rivierkm 878); midden: linkeroever (zuidoever) ter hoogte van Winssen (rivierkm 894); onder: rechteroever (noordoever) ter hoogte van Wely (rivierkm 896).

### 3. Monitoring

#### 3.1. Monitoringsplan

##### 3.1.1. Van onderzoeksvragen naar informatiebehoefte

De onderzoeksvragen A t/m S in §2.2 kunnen worden vertaald naar een informatiebehoefte: de informatie die beschikbaar moet komen om deze vragen te kunnen beantwoorden. Zodra deze informatiebehoefte helder is kan het monitoringsplan worden uitgewerkt. In onderstaande tabel 2 zijn de onderzoeksvragen uit §2.2 kort samengevat en is daarnaast de hierbij horende informatiebehoefte geformuleerd. Daarbij is aangegeven of deze informatiebehoefte door

Rijkswaterstaat wel (groen) of niet (rood) als een basisbehoefte wordt beschouwd (bijdrage Rico Tönis).

Bij een aantal onderzoeksvragen is geen informatiebehoefte ingevuld. Dit zijn vragen waar de pilot zich niet expliciet op richt maar waar het totale onderzoeksprogramma wellicht toch antwoorden op kan leveren.

Vervolgens kan de informatiebehoefte uit voorgaande paragraaf worden vertaald naar uit te voeren metingen en monitoringsplan. Ook deze vertaling is in onderstaande tabel samengevat; deze wordt in §3.1.2 in meer detail toegelicht.

Tabel 2. De onderzoeksvragen van §2.2 vertaald naar informatiebehoefte en de hiervoor uit te voeren metingen en monitoring: *Groen = basisbehoefte; rood = geen basisbehoefte.*

Onderzoeksvragen		Informatiebehoefte	Metingen en monitoring
<b>Veranderingen t.a.v. de kennis van 25 jaar geleden</b>			
A	Veranderingen scheepvaart afgelopen 25 jaar (afmetingen, vermogen, ...)	Statistiek scheepvaart Waal	Bureaustudie
B	Verandering processen en beheer afgelopen 25 jaar (baggeren/storten, vergroving bedding, ...)	Actualisatie sedimentbalans Waal (t.o.v. die in Hillebrand en Frings, 2017)	Bureaustudie
C	Effect kribverlaging op dynamiek kribvakken	Sterkte stroming en reactie zandconcentratie bij situaties met en zonder scheepvaart (bij voorkeur: recht traject zuidoever)	Procesmetingen waterstand - stroomsnelheid – zandconcentratie + registratie eigenschappen passerende scheepvaart (en vergelijking met meetresultaten 1996-1997)
<b>Proceskennis</b>			
D	Rol zuiging schepen op erosie kribvakstrand	<i>Inzicht in de mate waarin de snelheid waarmee sediment vanuit kribvak naar zomerbed verdwijnt afhangt van locatie noord- / zuidoever, of buitenbocht / rechte delen rivier</i>  <i>Inzicht in welke hydraulische parameters de belangrijkste rol spelen bij het op transport krijgen van het gesuppleerde sediment</i>	Tijdreeks bodemligging stranden in 3 clusters na suppletie: buitenbocht, recht traject noordoever, recht traject zuidoever (+ referentie)  Procesmetingen waterstand - stroomsnelheid - zandconcentratie + registratie eigenschappen passerende scheepvaart
E	Optimale korrelgrootteverdeling voor erosie	<i>Inzicht in de mate waarin de snelheid waarmee sediment vanuit kribvak naar zomerbed verdwijnt afhangt van de korrelgrootte van het gesuppleerde sediment</i>	Tijdreeks korrelgrootteverdeling toplaag suppletie
F	Optimale waterstand voor erosie	<i>Inzicht in de mate waarin de snelheid waarmee sediment vanuit kribvak naar zomerbed verdwijnt afhangt van hydraulische events; overzicht van hydraulische events die zijn opgetreden in de Waal tijdens de monitoringsperiode</i>	Data meetnet waterstanden Rijkswaterstaat
G	Optimaal deel kribvakstrand voor erosie	<i>Inzicht in de locaties in het kribvak waar het gesuppleerde sediment het eerste erodeert</i>	Tijdreeks bodemligging stranden in 3 clusters: buitenbocht, recht traject noordoever, recht traject zuidoever (+ referentie)
H	Invloed omvang suppletie op snelheid erosie		Tijdreeks bodemligging stranden in 3 clusters: buitenbocht, recht traject noordoever, recht traject zuidoever
I	Invloed suppletie op bodemleven kribvak	<i>Inzicht in de relatie tussen korrelgroottes en situering van gesuppleerde sediment in het kribvak enerzijds en kansen voor</i>	Monitoring bodemleven toplaag suppleties (jaarlijks) + Tijdreeks korrelgrootteverdeling toplaag suppletie + Monitoring waterleven

		<i>een verbetering van de ecologische toestand in het vak anderzijds</i>	en waterdynamiek landwaarts suppletie (jaarlijks)
<b>Effectiviteit ingreep</b>			
J	Invloed suppletie op vaargeul(onderhoud)	<i>Inzicht in hoe ver in het zomerbed het gesuppleerde (en geërodeerde) sediment nog zichtbaar is via multi beam en welk deel van het gesuppleerde sediment daar terecht komt</i>	Tijdreeks bodemligging zomerbed tussen kribvakstranden en vaargeul ter hoogte van de 3 clusters tot 2 km stroomafwaarts van de clusters
K	Reikwijdte invloed suppletie op vaargeul: 'zandmotor op afstand'	<i>Idem</i>	Beschikbare data peilingen vaargeul
L	Inzet suppletie voor grootschalige versus lokale erosie		Wordt niet onderzocht. Vraag is wellicht wel te beantwoorden uit de totale studie
<b>Beperking risico's uitvoering</b>			
M	Risico versterking erosie zomerbed		Wordt niet onderzocht. Vraag is wellicht wel te beantwoorden uit de totale studie
N	Mogelijkheden bijsturen erosie suppletie	<i>Inzicht in de (waterbouwkundige) aanpassingen in een kribvak waarmee de snelheid waarmee het gesuppleerde sediment erodeert kan worden (bij)gestuurd</i>	Wordt niet onderzocht. Vraag is wellicht wel te beantwoorden uit de totale studie
O	'No-regret' ontwerp suppletie bij niet functioneren zandmotor		Hier wordt bij ontwerp rekening mee gehouden: niet te <b>hoog</b> in vak suppleren. Monitoring bodemligging stranden biedt inzicht of ontwerp goed gekozen is.
P	Risico te snelle erosie suppletie	<i>Inzicht in de snelheid waarmee het gesuppleerde sediment uit het kribvak verdwijnt; antwoord op de vraag of 80% van het gesuppleerde sediment na twee jaar uit het kribvak verdwenen is</i>	Hier wordt bij ontwerp rekening mee gehouden: niet te <b>laag</b> in vak suppleren. Monitoring bodemligging stranden biedt inzicht of ontwerp goed gekozen is.
Q	Ontwerp suppletie met oog op hoogwaterveiligheid	<i>Inzicht in de impact van grootschalige kribvaksuppleties op de hoogwaterveiligheid</i>	Wordt niet onderzocht. Monitoring bodemligging stranden biedt wel inzicht of ontwerp leidt tot betere stroomgeleiding over kribben.
R	Duurzame uitvoering suppletie		Bureaustudie
S	Invloed suppletie op ecologie	Is wellicht een vereiste bij vergunningverlening	Monitoring bodemleven toplaag suppleties (jaarlijks)

### 3.1.2. Van informatiebehoefte naar monitoringsplan

De monitoring van het effect van de suppletie van kribvakken zou uit 3 delen kunnen bestaan: (1) de monitoring (gedurende 4 jaar) van de ontwikkeling van de bodemligging van het kribvakstrand inclusief oever (landzijde) en vooroever tot op de rand van de vaargeul (dus inclusief het deel zomerbed tussen vaargeul en oever) en aansluitend daarop de monitoring (gedurende 4 jaar) van de ontwikkeling van de bodemligging van het zomerbed tussen de oever (het steile talud van de kribvakstranden) en de vaargeul over een breedte van 50 meter en een traject van 2 km meteen stroomafwaarts van de suppletie (figuur 11), (2) metingen aan het proces van water- en sedimentbeweging in twee aaneengesloten kribvakken, een met en een zonder suppletie (bijvoorbeeld gedurende een zomer), en (3) monsters van de samenstelling van het sediment van de bovenste 5 cm en van de 5 cm daaronder (2 aparte monsters) van het kribvakstrand inclusief suppletie (om de 3 maanden gedurende 4 jaar). Daarnaast kan een vierde deel de monitoring van ecologische effecten van de suppletie zijn.

Voor de monitoring van de bodemligging van de rest van het zomerbed kan gebruik worden gemaakt van de monitoring die toch al voor vaargeulbeheer plaatsvindt. Als de frequentie van deze

monitoring in de komende jaren gelijk is aan die in de afgelopen jaren, zijn voor de vaargeul geen aanvullende peilingen nodig<sup>11</sup>. Wel moet de bodemligging van het zomerbed tussen de vaargeul en het kribvak aanvullend worden gemonitord (zie hierboven onder (1)); in dit deel van het zomerbed is de kans het grootst dat een effect van meer zandaanvoer door suppletie in kribvakken kan worden waargenomen, bijvoorbeeld in de afmetingen van beddingvormen.

Voor de vaargeul is de kans groot dat eventuele morfologische effecten van de kribvaksuppletie niet van de morfologische dynamiek door alle andere factoren en processen in de rivier te onderscheiden zijn. Dit wil niet zeggen dat er geen effect is; de onzekerheden in de bodempeilingen en de 'natuurlijke' dynamiek van het zomerbed zullen de effecten zeer waarschijnlijk domineren.

### **Ontwikkeling bodemligging - Peilingen**

Gedurende 4 jaar moet de bodemligging van het kribvakstrand worden gemonitord, over de volledige afstand tussen de kribben en van (bij voorkeur) de vegetatielijntot de rand van de vaargeul (inclusief een deel overlap, zie hierboven; figuur 11). Voor het onderwaterdeel zal dit met multibeam peiling worden gedaan, voor het droge deel (in principe<sup>12</sup>) met laseraltimetrie (LIDAR). Cruciaal is dat beide typen hoogtepeilingen goed op elkaar aansluiten (het liefst met overlap).

Voor de multibeampeilingen (MBES) kan, bijvoorbeeld, met een catamaran, jetski of drone tot vrij dicht bij de droge oever worden gemeten. Eventueel kan voor de ondiepere delen worden gekozen voor een gedetailleerde singlebeampeiling (SBES) waarvoor zelfs van een surfplank kan worden gemeten. Voor de zone tussen droge deel en het met echosounder gepeilde deel, kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van peilstokmetingen of andere vergelijkbare methoden. Belangrijk is dat gebruik wordt gemaakt van een goede verticale en horizontale positiebepaling (bijvoorbeeld geavanceerde GPS met grote nauwkeurigheid).

Voor de frequentie van de monitoring stellen wij het volgende schema voor:

- 1) Een 0-meting meteen na uitvoering van de suppletie
- 2) 2 dagen na de suppletie
- 3) 1 maand na de suppletie
- 4) 3 maanden na de suppletie
- 5) Gedurende 2 jaar na suppletie, elke 3 maanden
- 6) Gedurende 2 tot 4 jaar na suppletie, elke 6 maanden

Tijdens een hoogwater kan het hele kribvak met multibeam worden gepeild. Wij stellen voor bij een tussentijds hoogwater een extra peiling in het hele kribvak uit te voeren.

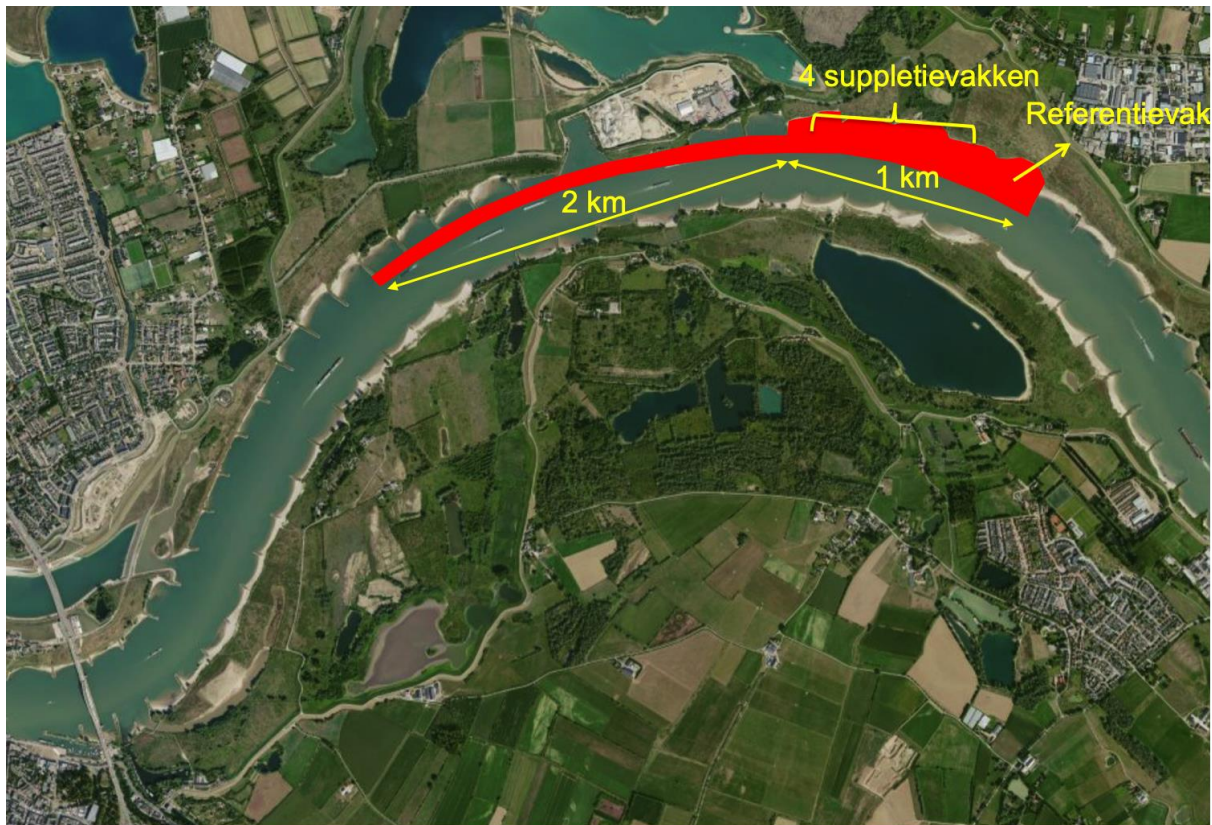
De eerste hoogteopname wordt uitgevoerd kort voor de suppletie. Deze opname is de referentie; door deze hoogteopname van die van de volgenden af te trekken kan het extra volume als gevolg van de suppletie worden berekend.

Bovenstaand schema van bodemhoogte opnamen geldt ook voor de monitoring van de ontwikkeling van de bodemligging van het zomerbed tussen de oever (het steile talud van de kribvakstranden) en de vaargeul over een traject van 2 km meteen stroomafwaarts van de suppletie.

---

<sup>11</sup> Waarschijnlijk gaat de frequentie waarmee de bodemligging van de vaargeul van de Waal wordt gepeild binnenkort van eens in de twee weken naar eens in de acht weken. Dit betekent dat het tijdsverschil tussen deze peiling en de peiling van de oeverzone maximaal vier weken kan bedragen. Dat tijdsverschil is waarschijnlijk te groot om de vaargeulpeiling en de aanvullende peiling van de oeverzone, voor wat betreft het morfologische gedrag van kleinschalige veranderingen, aan elkaar te kunnen 'knopen'. Echter, door te kiezen voor een breedte van de aanvullende peiling van 50 meter is waarschijnlijk een voldoende brede strook aan data beschikbaar om de ontwikkeling en het gedrag van deze bodemveranderingen te kunnen volgen.

<sup>12</sup> Er loopt nog een verkenning bij CIV met welke meetmethoden de bodemligging van het kribvakstrand het best kan worden bepaald.



*Figuur 11. De kribvakstranden en delen van het zomerbed waarvan de bodemligging gedurende een periode van 4 jaar moet worden gemonitord (voor frequentie: zie tekst hierboven). Afbeelding boven: bocht bij Gendt (rivierkm 878); afbeelding onder: linkeroever (zuidoever) ter hoogte van Winssen (rivierkm 894) en rechteroever (noordoever) ter hoogte van Wely (rivierkm 896).*

### **Ontwikkeling bodemligging - Innovaties**

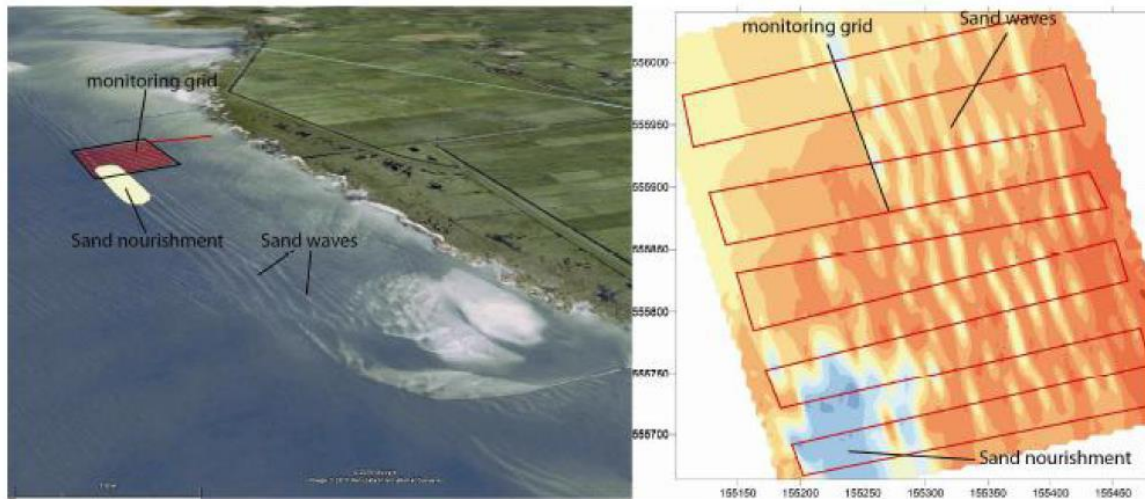
De pilot biedt mogelijkheden voor het inzetten van nieuwe technieken die mogelijkheden bieden voor een meer continue registratie van bodemveranderingen op specifieke locaties of profielen in het kribvak. Een goede mogelijkheid wordt geboden met “Distributed Temperature Sensing” (DTS) in glasvezelkabels (Buschman et al, 2017). De ruimtelijke resolutie van temperatuurbepaling voor veel glasvezelkabels is 1 m en kan worden uitgevoerd met enkele kilometers kabel. De toepassing van DTS in glasvezelkabels kan vooral uitkomst bieden op plaatsen die moeilijk toegankelijk zijn per



(meet)schip, zoals de bovengenoemde ondiepe zones.

Door een glasvezelkabel om een paal te winden en het temperatuurprofiel in de tijd te monitoren, kan de hoeveelheid materiaal dat geërodeerd of gesedimenteerd is worden vastgesteld. Ook kan de bodemligging hieruit worden bepaald.

De kabel kan ook in een patroon over de bodem worden gelegd en bedekt worden door een laag materiaal. De bodemdynamiek wordt vervolgens bepaald uit de temperatuur in de bodem. Een voorbeeld van een glasvezelmeting voor de monitoring van een zandsuppletie is weergegeven in Figuur 12. De verspreiding van het gesuppleerde zand en de vorming van zandgolven is duidelijk in de data terug te zien.



*Figuur 12. Geïnterpreteerd resultaat van een DTS (glasvezel-)meting. Rode kleuren geven aan dat de kabel aan het oppervlak ligt, wit = nabij het oppervlak, blauw = kabel begraven onder sediment (suppletie) (Buschman et al., 2017).*

### Procesmetingen

In de zomers van 1996 en 1997 is de water- en sedimentbeweging in kribvakken gemeten met meetframes op het strand en in de uitstroomopening net benedenstrooms van een krib. Aan de frames waren sensoren gemonteerd voor het meten van de stroomsnelheid, de zandconcentratie en de (variatie in de) waterstand (via waterdruk). Vergelijkbare metingen zouden ook nu weer uitgevoerd kunnen worden, met de meetsensoren die tegenwoordig veel voor dit type onderzoek worden gebruikt. Aanbevolen wordt, bijvoorbeeld, een aantal OBS-sensoren (Optical Backscatter point Sensor) te plaatsen op strategische locaties in het kribvak voor het waarnemen van (veranderingen in) sedimentconcentraties gedurende de eerste dagen/weken na de suppletie. Voor de ondiepere delen kan gebruik worden gemaakt van snelheidsmetingen door middel van EMS-en of ADVs (ADV's zijn minder gevoelig voor vervuiling). Dergelijke metingen leveren proceskennis op over het mechanisme achter de beoogde 'zandmotor'.

De kribben van de twee clusters in het rechte traject zijn verlaagd waardoor de kruinen van de kribben ongeveer 65% van de tijd onder water staan. Dit is veel vaker dan de situatie in 1996-1997. Dit betekent dat ook veel vaker dan in 1996-1997 water over de stranden van deze clusters stroomt, en dat de rivierstroming nu wellicht ook sediment van de stranden in beweging brengt bij (relatief lage) afvoeren waar dit in 1996-1997 niet het geval was. Daarom moet ook worden gemeten aan de waterbeweging boven de kribvakstranden als de kribben overstromen, en aan de hoeveelheid sediment die dan in beweging komt. Voor deze metingen dienen dezelfde sensoren te worden gebruikt als de sensoren waarmee aan de door scheepvaart geïnduceerde water- en sedimentbeweging wordt gemeten.

De sensoren registreren de verandering in water- en sedimentbeweging bij passerende schepen en bij rivierstroming als de kribben onder water staan. Het leegzuigen en weer vollopen van de vakken kan ook met een camera op een paal als continue tijdreeks worden geregistreerd. De camerabeelden kunnen worden verwerkt tot een verplaatsing van de waterlijn boven het kribvakstrand. Zo kan onderzocht worden of deze verplaatsing aan de gemeten water- en sedimentbeweging bij passerende schepen kan worden gerelateerd. Zo ja, dan kan op meerdere locaties met camera's worden gewerkt en kunnen die beelden worden vertaald naar de water- en sedimentbeweging.

De toepassing van camera's is een innovatief onderdeel waarvoor nader moet worden verkend wat op dit terrein mogelijk is. Wellicht kan gebruik worden gemaakt van video (of hoogfrequente foto opnames) die met particle-tracking technieken tot stroombeelden worden vertaald. Andere mogelijke innovaties zijn de toepassing van radar<sup>13</sup> en technieken met laser-guns die de beweging van het wateroppervlak kunnen vertalen naar een stroombeeld. Wellicht kan kennis worden ontleend uit de toepassing van camera's in kustonderzoek.

### **Samenstelling toplaag**

Door periodiek monsters te nemen van de toplaag van het kribvakstrand en hier de zeefkromme van te bepalen kan worden gevolgd in hoeverre de erosie van het gesuppleerd sediment selectief is en of de suppletie ook de sedimentsamenstelling van de rest van het kribvakstrand beïnvloedt. Selectieve erosie kan optreden als de fijnere fractie wel en de grovere fractie niet in beweging komt; dit kan tot afpleistering van de toplaag van het gesuppleerde sediment leiden. Een deel van het geërodeerde sediment kan elders in het kribvak bezinken en daar de samenstelling van de toplaag beïnvloeden.

Deze monitoring moet plaatsvinden in meerdere kribvakken. Wij stellen voor de monitoring uit te voeren in twee aaneensluitende kribvakken voor elk van de drie clusters (noordoever – zuidoever - buitenbocht): in de vakken met de suppleties volgens ontwerpen 1 en 2 (figuur 13)<sup>14</sup>. De monitoring moet meerdere keren per jaar plaatsvinden, bij voorkeur op dezelfde momenten waarop de bodemligging van het kribvakstrand en het aansluitende zomerbed wordt ingemeten. De monitoring moet starten met een bemonstering vóór de suppletie en met een bemonstering meteen na uitvoering van de suppletie.

De zeefkrommen moeten de hele range aan korrelgroottes, van silt tot grof grind, omvatten. Op alle te bemonsteren locaties moeten steeds twee monsters worden genomen: van de bovenste 5 cm en van de 5 cm daaronder.

Op ieder moment dat de drie vakken worden bemonsterd moeten 24 monsters worden genomen: 12 van de bovenste 5 cm, 12 van de 5 cm daaronder. Van de 12 monsterlocaties moeten er 8 op de suppletie liggen en 4 landwaarts daarvan (zie figuur 13). Bij voorkeur wordt van alle monsters een zeefkromme bepaald. Als hiervoor onvoldoende budget beschikbaar is, kan een andere strategie worden gevolgd, bijvoorbeeld door monsters voor het zeven samen te voegen: (1) bovenste 5 cm monsters van de 8 locaties op de suppletie bij elkaar; (2) onderste 5 cm monsters van de 8 locaties op de suppletie bij elkaar; (3) bovenste 5 cm monsters van de 4 locaties landwaarts van de suppletie bij elkaar; (4) onderste 5 cm monsters van de 4 locaties landwaarts van de suppletie bij elkaar.

---

<sup>13</sup> Zie bijvoorbeeld: <https://www.koenders-instruments.com/producten/rss-2-300-wl-radar-flow-level-sensor-geolux/>

<sup>14</sup> Afhankelijk van het belang dat Rijkswaterstaat hecht aan de monitoring van ecologische effecten van ontwerp 1 zou ervoor kunnen worden gekozen deze monsternamen te beperken tot ontwerp 2.



*Figuur 13. Schets van de voorgestelde locaties voor het nemen van bodemonsters van de bovenste 0-5 cm en 5-10 cm van de toplaag. uitvoering van de suppletie van kribvakken, volgens 2 ontwerpen (1) een ontwerp waarbij de suppletie aansluit op beide kribben (boven), en (2) een ontwerp waarbij tussen de suppletie en beide kribben een afstand van 25 m wordt aangehouden (onder).*

De kans bestaat dat het gesuppleerde sediment meteen na suppletie in eerste instantie minder dicht gepakt is (een lage dichtheid heeft) dan de situatie die binnen een termijn van (bijvoorbeeld) enkele dagen wordt bereikt. Dit hangt af van de wijze waarop de suppletie wordt uitgevoerd. Een minder dichte pakking betekent mogelijk dat het sediment in eerste instantie wat gemakkelijker erodeert dan in de dagen of weken daarna. Wij bevelen daarom aan van de bodemonsters die meteen na de suppletie, 2 dagen na de suppletie en een maand na de suppletie worden genomen, ook de natte dichtheid te bepalen.

### **Effecten op ecologie**

Monitor de effecten van de suppletie op het bodemleven in het kribvak door eens per jaar het bodemleven in het gesuppleerde sediment en in het referentievak op meerdere locaties te bemonsteren en te analyseren op aanwezige diersoorten. Voer deze bemonstering ook uit in het kribvak voordat de suppletie wordt uitgevoerd<sup>15</sup>. Dit moet in elk van de 3 clusters (rechte trajecten noord- en zuidoever en de bocht bij Gendt) gebeuren. Bemonstering kan met een onderwaterstofzuiger, bijvoorbeeld door Bureau Waardenburg. Doe dit in het voorjaar. De monsters binnen een kribvak kunnen worden gecombineerd voordat de analyse van het bodemleven wordt uitgevoerd. Dit betekent dat in totaal 6 monsters moeten worden geanalyseerd; dit moet in totaal 5 keer gebeuren (meteen voor de suppletie en 4 jaar lang jaarlijks).

Meet aanvullend de waterbeweging tijdens passerende schepen in het ondiepe water landwaarts van de suppletie, in een kribvak met een suppletie volgens ontwerp 1 en een vak met een suppletie volgens ontwerp 2 (zie figuur 8). Sluit voor de uitvoering van deze metingen bij voorkeur aan op de uitvoering (in tijd en frequentie) van de procesmetingen van de water- en sedimentbeweging bij passerende schepen (zie hierboven).

### **Prioritering monitoring**

Met bovenstaand 'totaalpakket' aan metingen en monitoring kunnen de ontwikkeling van de suppletie en de meetbare effecten op het zomerbed worden gevolgd, en kunnen de drijvende

<sup>15</sup> Het is in principe niet nodig deze bemonstering meteen na de suppletie uit te voeren; aangenomen mag worden dat er geen bodemleven zit in het sediment op het moment dat het wordt gesuppleerd.

krachten (processen) achter deze ‘zandmotor’ worden geanalyseerd. Voor het geval het (financieel) niet haalbaar is dit totaalpakket uit te voeren, wordt hier een onderscheid gemaakt in

1. het deel van dit pakket dat moet worden uitgevoerd om de effectiviteit van de suppletie vast te stellen;
2. metingen die het inzicht in deze effectiviteit versterken;
3. het deel dat moet worden uitgevoerd om de onderliggende processen van deze zandmotor te begrijpen (en deze kennis later eventueel in modelering toe te passen);
4. metingen en monitoring van ecologische effecten van de suppletie. Dit deel neemt in het ‘totaalpakket’ een bijzondere plaats in: de metingen (in het water landwaarts van suppletie volgens ontwerp 1) en de monitoring (van de ontwikkeling van het bodemleven in de toplaag van de suppletie en het waterleven landwaarts van de suppletie) zijn niet nodig voor de studie naar het functioneren van de suppletie als zandmotor maar voor de nevendoelelstelling van ecologische meerwaarde en (mogelijk) met het oog op de vergunningverlening;
5. toepassing van innovatieve meetmethoden, waarbij de pilot kribvaksuppletie wordt benut voor het testen van innovaties voor het meten van water- en sedimentbeweging en veranderingen in morfologie. Deze innovaties kunnen eventueel bijdragen aan de delen 1 t/m 4.

In tabel 3 zijn deze vijf delen geprioriteerd op basis van de kennis die minimaal nodig is om de resultaten van deze pilot te kunnen vertalen naar een eventuele toepassing van kribvaksuppleties in het operationeel rivierbeheer van de toekomst.

*Tabel 3. De prioritering van de noodzaak van de uitvoering van bovenstaande 5 delen metingen en monitoring op basis van de toepassing van de resultaten van de pilot voor toekomstig operationeel rivierbeheer.*

Doel	Deelpakket metingen/monitoring	Prioriteit
Effectiviteit suppletie	15 keer LIDAR hoge deel stranden voor 3 clusters met 5 kribvakken per cluster	Hoog
	15 keer multibeam lage deel stranden voor 3 clusters met 5 kribvakken per cluster	Hoog
	15 keer multibeam zomerbed tussen talud stranden en vaargeul ter hoogte van de 3 clusters van 5 kribvakken tot 2 kilometer stroomafwaarts van de clusters	Hoog
Meer inzicht effectiviteit suppletie	15 keer bemonstering korrelgrootte toplaag (0-5 cm en 5-10 cm) van het strand in 3 (ontwerp 2) of 6 (ontwerp 1 + 2) kribvakken	Middel
Inzicht processen zandmotor	Procesmetingen water- en sedimentbeweging	Laag
Toepassing innovaties		Laag
Ecologische effecten suppletie	5 keer bemonstering 6 vakken; 5 keer analyse bodemleven 6 gecombineerde monsters	Hangt af van vereisten vergunningverlening
	5 keer bemonstering waterleven landwaarts suppletie in 6 vakken; 5 keer analyse waterleven	Laag
	Procesmetingen waterbeweging in ondiep water landwaarts suppletie	Laag

## 3.2. Monitoringsorganisatie

### 3.2.1. Verantwoordelijkheden, expertise en tijdplanning

#### Projectleiding en ondersteuning

De pilot kribvaksuppletie zal worden uitgevoerd door een team van medewerkers met verschillende taken en verantwoordelijkheden, en werkzaam bij verschillende organisaties (overheid, markt, kennisinstellingen). De dagelijkse leiding van dit team zal in handen zijn van een projectleider van Rijkswaterstaat. Deze heeft de dagelijkse leiding (regie) over de uitvoering van taken en verantwoordelijkheden van alle betrokkenen, maar niet over de inhoud.

De projectleider wordt ondersteund door (1) een medewerker die werksessies en overleggen voorbereidt en die de relaties met betrokken bedrijven en (kennis)instellingen onderhoudt, (2) een medewerker met kennis van de werkwijze van projectbeheersing en contracten bij Rijkswaterstaat, en (3) een projectleider van CIV die verantwoordelijk is voor de realisatie van de monitoring door Rijkswaterstaat of externe partijen.

#### Data-inwinning en verantwoording

De regie van de data-inwinning en verantwoording van de ingewonnen data conform afspraken is in handen van Rijkswaterstaat (zie hierboven). De inwinning en verantwoording zelf kan in handen zijn van Rijkswaterstaat, marktpartijen of kennisinstellingen, afhankelijk van de keuzes die Rijkswaterstaat hiervoor maakt. Die keuzes bepalen ook of dit onderdeel van het project door een andere partij wordt uitgevoerd dan de partij die verantwoordelijk is voor de analyse en (wetenschappelijke/inhoudelijke) rapportage. Als een kennisinstelling wordt ingeschakeld voor data-inwinning ligt het voor de hand deze partij ook de analyses en rapportage te laten verzorgen. Als een marktpartij wordt ingeschakeld is het wellicht verstandiger voor de analyse en rapportage een kennisinstelling in te schakelen.

#### Data-opslag

pm

#### Analyse en rapportage

Er is een onderscheid tussen data-rapportage en inhoudelijke rapportage van de, op basis van deze data, uitgevoerde analyses. De data-rapportage moet worden opgeleverd door de partij die de monitoring verzorgt. Het gaat hierbij vooral om de verantwoording van de ingewonnen data i.r.t. de afspraken met Rijkswaterstaat (kwaliteit, toegepaste methoden, frequentie inwinning, e.d.). Experts zullen vervolgens met deze data inclusief deze verantwoordingsrapportage aan de slag gaan en analyses uitvoeren gericht op (een deel van) de onderzoeksvragen in §2.2. Ook hier geldt dat het afhangt van de keuzes van Rijkswaterstaat welke experts hiervoor worden ingeschakeld. Een keuze met meerwaarde die het doel van dit project kan overstijgen is inpassing van de analyses en rapportage in een wetenschappelijk (promotie)onderzoek naar de invloed van de scheepvaart op de sedimentbeweging en morfodynamiek van de Waal (zie §3.2.3).

Rijkswaterstaat wil deze pilot ook gebruiken om bedrijven en kennisinstellingen de kans te bieden innovaties op het gebied van metingen en analyses aan de water- en sedimentbeweging in (geselecteerde) kribvakken uit te proberen.

#### Tijdplanning

Deze pilot stopt eind 2027; dan moet de pilot zijn afgerond en moet het evaluatierapport beschikbaar zijn. De monitoring moet een jaar eerder zijn afgerond, dus eind 2026.

3 jaar na de uitvoering van de suppletie, dus medio 2025, moet een tussentijds verslag beschikbaar zijn.

### 3.2.2. Organisatie op onderdelen

#### Ontwikkeling bodemligging

De organisatie van de monitoring van de bodemligging van de kribvakstranden zal bij Rijkswaterstaat moeten liggen; de uitvoering kan eventueel aan een marktpartij worden uitbesteed. Aanbevolen wordt om bij de monitoring van het droge strand en het ondiepe deel waar de multibeam niet kan meten expertise te betrekken voor het opnemen van de strandhoogte aan de kust. Aanbevolen wordt de analyse van de data te laten uitvoeren door de partij die de data inwint, op basis van een afgesproken protocol.

#### Procesmetingen

De organisatie en uitvoering van de metingen aan de water- en sedimentbeweging in geselecteerde kribvakken zal Rijkswaterstaat waarschijnlijk niet zelf kunnen uitvoeren (maar wel ondersteunen met eigen scheepscapaciteit of ingehuurde capaciteit van de markt). Hier zal wellicht een universiteit of hogeschool bij betrokken moeten worden (Universiteit Utrecht; Wageningen Universiteit; Hogeschool van Arnhem en Nijmegen). Wellicht kan aansluiting worden gezocht bij het Rivers2Morrow onderzoek naar nieuwe meetmethoden voor sedimenttransport. Aanbevolen wordt om bij experts te verkennen welke technieken op dit moment voor dergelijk onderzoek bij marktpartijen en kennisinstellingen beschikbaar zijn.

#### Scheepspassages

Voor de hele periode van de monitoring, vanaf het moment van suppleren tot het moment van de laatste hoogteopname van de kribvakstranden, moeten de relevante gegevens van passerende schepen (zie hiervoor Ten Brinke, 2003) worden verzameld.

### 3.2.3. Meer dan de som der delen

Waarschijnlijk is de scheepvaart op de Waal een niet te verwaarlozen factor bij het sedimenttransport en de morfodynamiek van de rivier. Vooral de grote schepen, die met een in de loop der jaren toegenomen motorvermogen tot dicht boven de bodem (en soms door toppen van duinen) varen, zullen niet alleen de water- en sedimentbeweging langs de oevers (en in de kribvakken) maar ook die in het zomerbed beïnvloeden. Hoe groot die invloed is, is echter niet bekend. Er is in de Waal nog geen onderzoek naar verricht. Een wetenschappelijk (promotie)onderzoek naar de invloed van de scheepvaart op de sedimentbeweging en morfodynamiek van de Waal zou een waardevolle aanvulling kunnen zijn op de reeks promotieonderzoeken die nu binnen Rivers2Morrow worden uitgevoerd. In die reeks onderzoeken is de rol van de scheepvaart een missende schakel.

De monitoring van de kribvaksuppletie inclusief de procesmetingen zouden goed in een dergelijk onderzoek kunnen worden ingepast. Het geheel is meer dan de som der delen: de verschillende onderdelen (monitoring bodemligging, procesmetingen) versterken elkaar in het verkrijgen van meer inzicht in de mechanismen achter deze 'zandmotor'. Aanbevolen wordt om het onderzoek dan wel te verbreden naar de invloed van de scheepvaart op het zomerbed. Ook wordt aanbevolen te verkennen of een dergelijk wetenschappelijk onderzoek in samenwerking met Duitse partners kan worden opgezet zodat de kennisontwikkeling zich kan richten op een traject tot aan Duisburg (bijvoorbeeld) en bijdraagt aan meer inhoudelijke samenwerking 'over de grens'.

## Referenties

Arcadis (2016a). Morfologische ontwikkeling oevers na kribverlaging op basis van laseraltimetrie gegevens 2010 t/m 2015. Rapport 079024453:0.7.

Arcadis (2016b). Morfologische ontwikkeling hoofd- en vaargeul na kribverlaging op basis van multibeam gegevens in de periode 2009 - 2015. Rapport 078850700:A.

Bouwdienst Rijkswaterstaat (2002). Kribvaksuppletie in de Waal.

Brinke, W.B.M. ten (2003). De sedimenthuishouding van kribvakken langs de Waal. Het langjarig gedrag van kribvakstranden, de invloed van scheepsgeïnduceerde waterbeweging en morfologische processen bij hoge en lage afvoeren. Rapport Rijkswaterstaat RIZA 2003.002.

Brinke, W.B.M. ten, Schulze, F.H. and P. Van der Veer (2004). Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: The impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications* 20: 1-30.

Buschman, F., Blom, A., van Dijk, T., Kleinhans, M. en R. van der Mark (2017). Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn. NKWK-pilot 2016 - A2. Deltares Rapport 11200356-000-ZWS-0004, Mei 2017.

Duijn, P.P. (1996); Kribvaksuppletie, een goed alternatief ? Evaluatie van een zandsuppletie in drie kribvakken langs de Waal bij Ewijk. Rapport Rijkswaterstaat W-DWW-96-062.

Emmanouil, A., 2017. Analysis of measured data of sediment nourishments in the Rhine River. MSc-thesis Delft University of Technology.

Frings, R.M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S. and T. Hoffmann, 2019. From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews* 196, 102830.

Kok, M.P. (2020). Groyne field nourishments. A research into the application of feeder nourishments to supply sediment to the main channel. MSc thesis Delft University of Technology.

Sieben (2006). Functioneel kribontwerp op riviertak- en uiterwaardniveau. Werkdocument Rijkswaterstaat RIZA 2002.064.