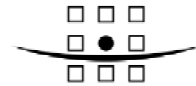


**Debietscenario's en morfologische  
berekeningen**  
Groene Rivier Pannerden

Dienst Landelijk Gebied

9 februari 2007  
Definitief rapport  
9P7017.03

A COMPANY OF



**ROYAL HASKONING**

HASKONING NEDERLAND B.V.  
KUST & RIVIEREN

Barbarossastraat 35  
Postbus 151  
6500 AD Nijmegen  
(024) 328 42 84 Telefoon  
(024) 360 54 83 Fax  
info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail  
www.royalhaskoning.com Internet  
Arnhem 09122561 KvK

Documenttitel Debietscenario's en morfologische  
berekeningen  
Groene Rivier Pannerden  
Verkorte documenttitel Morfologische berekeningen  
Status Definitief rapport  
Datum 9 februari 2007  
Projectnaam MER Groene Rivier Pannerden  
Projectnummer 9P7017.03  
Opdrachtgever Dienst Landelijk Gebied  
Referentie 9P7017.03/R0004/418730/MJANS/Nijm

Auteur(s) Ir. T.M. Kluyver  
Collegiale toets Ir. G.J. Akkerman  
Datum/paraaf .....  
Vrijgegeven door Drs. M.C. de Vriend  
Datum/paraaf .....

## INHOUDSOPGAVE

	Blz.
1 INLEIDING	1
2 ANALYSE VAN DE VRAAGSTELLING	2
3 EFFECTEN OP DE NATUURONTWIKKELINGSPOTENTIES	4
3.1 Algemeen	4
3.2 Belang van hoogdynamische omstandigheden in de Groene Rivier	4
4 MORFOLOGISCHE EFFECTEN	7
4.1 Morfologische stabiliteit van de Groene Rivier	7
4.2 Aanzandingen Pannerdensch Kanaal	8
5 CONCLUSIES	10
6 LITERATUURLIJST	11

## BIJLAGEN

1. Technische beschrijving morfologische berekeningen
2. Kaarten bodemhoogte instroomopening

## 1 INLEIDING

Voor u ligt een rapport dat ingaat op de effecten van een inrichting van de nieuw te graven Groene Rivier langs het Pannerdensch Kanaal, waarbij het debiet door de Groene Rivier gevarieerd wordt tussen 3% en 4,5% van het totale debiet van het Pannerdensch Kanaal (uitgaande van bedvullende afvoer van de Groene Rivier). In de rapportage gaat het daarbij om de effecten op de morfologie van het Pannerdensch Kanaal (aanzanding in relatie tot scheepvaart) en de effecten op de natuurontwikkelingspotenties van de Groene Rivier.

Hieronder worden in hoofdstuk 2 eerst het kader en de aard van de vraagstelling beschreven. In hoofdstuk 3 komen de verschillen qua natuurontwikkelingspotenties aan de orde en in hoofdstuk 4 de morfologische effecten. Hoofdstuk 5 sluit af met conclusies.

## 2 ANALYSE VAN DE VRAAGSTELLING

Voor de Groene Rivier Pannerden wordt een MER opgesteld voor de aanleg van een meestromende Groene Rivier in de uiterwaard aan de oostzijde van het Pannerdensch Kanaal. De Groene Rivier wordt gerealiseerd om nieuwe dynamische riviergebonden natuurwaarden te realiseren in combinatie met een dusdanige verlaging van de waterstand dat de rivier voldoende ruimte biedt om een verhoging van de rivierafvoer van de Rijn (bij Lobith van 15.000 naar 16.000 m<sup>3</sup>/sec) op te vangen zonder dat de veiligheidssituatie ter plekke verandert. De Groene Rivier Pannerden is de eerste fase van de realisatie van het Inrichtingsplan Rijnwaardense Uiterwaarden uit 2001, dat een breed draagvlak heeft onder de betrokken organisaties en bij de bevolking.

Bij de beoordeling van maatregelen hanteert Rijkswaterstaat de norm dat bij bedvallende afvoer niet meer dan 3% van het water mag afstromen via een nevengeul. Voorwaarde is dat er in de vaargeul een overdiepte van 2 dm aanwezig is. Deze norm is bedoeld om ongewenste effecten voor de scheepvaart zoveel mogelijk te voorkomen door sedimentatie en baggeractiviteiten in de hoofdgeul te beperken. Onttrekkingen boven deze norm zijn in principe niet toegestaan. Voor de Groene Rivier zijn uitgebreide hydraulische en morfologische berekeningen uitgevoerd om de sedimentatie in de vaargeul te onderzoeken. De situatie is extra complex omdat de Groene Rivier dicht bij het splitsingspunt Pannerdense Kop ligt en een verandering van de afvoerverdeling bij hoogwater niet kan worden toegestaan. In de rivierkundige toets van Rijkswaterstaat (d.d. 26 april 2006, toegevoegd als bijlage 10 bij het MER Groene Rivier Pannerden) heeft een kwalitatieve analyse van de morfologische effecten plaatsgevonden. Hieruit blijkt dat sprake kan zijn van geringe morfologische effecten bij een debiet van 3 % in de nevengeul bij de Groene Rivier Pannerden. Aangezien in de vaargeul een overdiepte van 2 dm aanwezig is, bleek een debiet van 3 % acceptabel.

Deze berekende situatie leidt echter tot een aanzienlijke verkleining van de oorspronkelijk beoogde instroomopening (zo werd in de Technische Onderbouwing van het Inrichtingsplan (RIZA, 2001) nog uitgegaan dat bij een duiker van circa 10 meter breedte een debiet van 3,1 % zou optreden.). Uit de bovengenoemde berekeningen blijkt dat een duiker met een breedte van slechts 4 m mogelijk is. Bij een debiet door de Groene Rivier van 38 m<sup>3</sup>/sec (= 3% van de totale afvoer door het Pannerdensch Kanaal, geldend voor bedvallende afvoer van de Groene Rivier) bedraagt de stroomsnelheid in de Groene Rivier dan circa 0,2 m/sec. Bij lage afvoeren op het Pannerdensch kanaal zal dan praktisch gesproken al gauw sprake zijn van nagenoeg stilstaand water in de Groene Rivier. De stroomsnelheden zijn niet voldoende om de in het Inrichtingsplan vastgestelde en in het MER overgenomen natuurdoelen, gekoppeld aan hoogdynamische omstandigheden, te kunnen halen. Derhalve is voorgesteld via een grotere duiker een hoger debiet naar de Groene Rivier toe te staan van 4,5% bij de bedvallende afvoer van de Groene Rivier, waardoor de stroomsnelheid in de Groene Rivier zal toenemen tot circa 0,3 m/s, in plaats van circa 0,2 m/s.

Royal Haskoning heeft door middel van nadere modelberekeningen de effecten hiervan bepaald. Het gaat hierbij om de te verwachten aanzanding op het Pannerdensch Kanaal en de hiermee geassocieerde effecten op de scheepvaart. De uitkomsten hiervan zijn in deze rapportage samengevat in hoofdstuk 4.

In bijlage 1 is een technische beschrijving gegeven van de uitgevoerde berekeningen.

Verder hebben DLG en Rijkswaterstaat gevraagd het verschil qua perspectief voor de natuurontwikkeling tussen 3% en 4,5% op een rij te zetten; dit is gedaan onder hoofdstuk 3. Conclusies worden in hoofdstuk 5 getrokken.

De nagestreefde onttrekking van 4,5 % is geen bovengrens; het zou denkbaar zijn, bijvoorbeeld in de toekomst, méér te onttrekken. Het is thans veeleer een praktische grens, waarbij verwacht wordt dat enerzijds de minimaal na te streven natuurpotenties kunnen worden gehaald en anderzijds geen ontoelaatbare risico's met betrekking tot aanzanding en morfologische stabiliteit van de Groene Rivier optreden. Indien in de praktijk blijkt dat de effecten voor de scheepvaart toch nadeliger zijn dan berekend, zal de omvang van de onttrekking wellicht toch verminderd moeten worden.

### **3 EFFECTEN OP DE NATUURONTWIKKELINGSPOTENTIES**

#### **3.1 Algemeen**

In het Inrichtingsplan Rijnwaardense Uiterwaarden (RIZA, 2001) en de achterliggende onderzoeken en studies, waaronder de Technische Onderbouwing, is op basis van de abiotische-, biotische karakteristieken en ecologische potenties een uitgebreide analyse gemaakt van de natuurontwikkelingsmogelijkheden. De uit deze studie voor de verschillende gebieden afgeleide natuurdoelen sluiten aan bij de karakteristieke kenmerken, de huidige waarden, de mogelijkheden en kansen en de plaats/ functie van het gebied in het grotere geheel van de Rijnwaardense Uiterwaarden en van de gehele Gelderse Poort.

#### **3.2 Belang van hoogdynamische omstandigheden in de Groene Rivier**

Voor de Groene Rivier wordt uitgegaan van het omzetten van productiegrasland in nieuwe veerkrachtige en hoogdynamische natuur. Gelet op het relatief grove substraat (grof zand en ook grindvoorkomens), het relatief grote verval van het Pannerdensch Kanaal en de grote beschikbare lengte (ca 3 km), wordt ingezet op: “een permanent meestromende Groene Rivier met brede oeverzones en een relatief hoge stroomsnelheid, waarin voor zover de veiligheid van de dijk dat toelaat, ook ruimte is voor het ontstaan van (hoog)dynamische omstandigheden” (Inrichtingsplan Rijnwaardense Uiterwaarden, 2001).

Vrijwel overal elders langs de Rijntakken en overigens ook in de andere delen van de Rijnwaardense Uiterwaarden/ Gelderse Poort gebied, is niet of nauwelijks sprake van karakteristieken, die zich lenen voor de ontwikkeling van een relatief hoge dynamiek. Riviernatuur gekoppeld aan laagdynamische omstandigheden (aanmeldingsplichtig cf. Habitatrichtlijn) wordt op heel veel plaatsen ontwikkeld. Van de hoogdynamische omstandigheden kan voor het riviergebied karakteristieke en bijzondere flora en fauna profiteren en kan bovendien een uniek biotoop worden ontwikkeld, waarin rheofiele (=stromingsminnende) vissoorten uit de Barbeelgroep kunnen paaieren. Een biotoop dat in Nederland elders wel langs de Maas, maar nergens anders in het stroomgebied van de Rijntakken kan worden aangetroffen. Dit soort habitats valt onder de aanwijzingsplicht conform de Habitatrichtlijn. Dit betekent dat ook internationaal aan de natuurwaarden van dergelijke hoogdynamische omstandigheden een hogere waarde wordt toegekend dan aan de aan laagdynamische omstandigheden gekoppelde riviernatuur.

Om de na te streven aan de rivier gekoppelde hoogdynamische natuurdoelen op meer dan 50% van het plangebied van de Groene Rivier te realiseren zijn de sleutelprocessen, die in het Inrichtingsplan en in het MER nader zijn geïdentificeerd: begrazing en rivierdynamiek.

Het gaat bij de aquatische rivierecologie om de volgende relevante biotopen: (slik)oevers, luwe plekken, inundatiegraslanden en om locaties met hoge stroomsnelheden met grindbodems die als paaimilieu fungeren voor stromingsminnende (rheofiele) vissoorten. Door de geul lokaal ondiep te houden op plaatsen waar grindgrofkorrelig zand aanwezig is (of wordt aangebracht) ontstaat een geschikt paaibiotoop met een grindbodem voor rheofiele vissoorten. Door plaatselijke verondieping of vernauwing van de geul wordt de snelheid verhoogd.

Bij deze verhoogde snelheden blijft het grove zand/ grind schoon (slibvrij). Kraamkamers ontstaan op de luwe plekken waar de stroomsnelheid gering zal zijn (<1 m/s). (Zie voor locaties en ontwerpen verder het ontwerp in paragraaf 3.2 van H3 Bijlage 4 van het concept MER).

Bij de stromingsminnende vissoorten (zie ook intermezzo in onderstaande box) behorend tot de Barbeelgroep (Barbeel, Kopvoorn, Rivierprik en Rivierdonderpad) geldt dat de ecologische eisen per soort variëren. Twee ervan, de Rivierprik en de Rivierdonderpad zijn vissoorten van bijlage II van de Habitatrictlijn, waarvoor de Gelderse Poort is aangemeld.

#### **Intermezzo: biotoeisen van vissoorten uit de Barbeelgroep**

##### Barbeel

Jonge Barbelen zoeken ondiepe delen van de rivier op. Dit betreffen relatief snelstromende delen met zanderige grindbodems ([www.visserslatijn.nl](http://www.visserslatijn.nl); [www.visenwater.nl](http://www.visenwater.nl)).

##### Kopvoorn

Jonge Kopvoorns hebben ondiepe, beschutte plaatsen nodig, waar op de zand- of grindbodem plaatselijk ook slib wordt afgezet ([www.visenwater.nl](http://www.visenwater.nl)).

##### Rivierdonderpad

De Rivierdonderpad is zeer honkvast (omdat het een slechte zwemmer is) en heeft een voorkeur voor harde, stenige bodems. Schuilgelegenheid in de vorm van stenen, takken en boomwortels zijn de belangrijkste randvoorwaarden voor het voorkomen van de soort. De soort komt vooral voor in heldere, kleinere stromende wateren met een zandige of stenige bodem, maar komen echter ook voor in stilstaande wateren, vooral in de met basaltblokken of puin beschermde oeverzone van grote meren en plassen ([www.visenwater.nl](http://www.visenwater.nl)). De stroomsnelheid is hiermee niet bepalend voor het wel of niet voorkomen van de soort.

##### Rivierprik

De Rivierprik brengt een groot deel van zijn leven door als larve (eerste 3 à 4 jaar), op slibrijke plekken in de bodem van rivieren en beken. Ze filteren daar kleine organismen uit het water. Deze larven kunnen zich over grote afstand met de stroming laten meevoeren, om zich vervolgens op een andere plaats weer in de bodem te vestigen ([www.visenwater.nl](http://www.visenwater.nl)).

In de paaitijd (mei-juni) hebben de vissoorten gemiddeld ca 0,35 m/s lokstroom nodig met een bandbreedte van ca 0,1- 0,8 m/s. Uit de literatuur ([www.visserslatijn.nl](http://www.visserslatijn.nl); [www.visenwater.nl](http://www.visenwater.nl)) met betrekking tot de genoemde soorten blijkt voorts dat de optimale stroomsnelheid in de paaigebieden varieert van 0,1 – 0,3 m/s (Rivierdonderpad), via 0,2 – 0,6 m/s (Barbeel) en 0,9 – 1,4 cm/sec (Kopvoorn) tot 1,0 – 2,0 m/s (Rivierprik). De lokstroom moet daarnaast voldoende volume hebben om breed in de rivier (in dit geval het Pannerdensch Kanaal) voelbaar te zijn.

Uit de berekeningen blijkt dat de gemiddelde stroomsnelheid in de nevengeul bij een verhoging van het debiet van 3% naar 4,5% met 50% toeneemt (van 0,2 m/s naar 0,3 m/s). Vertaald naar de eisen die de verschillende vissoorten stellen kan worden geconcludeerd dat in het eerste geval de lokstroom (bij bedvullende omstandigheden) te laag zal zijn om paaiomstandigheden te creëren voor Barbeelachtigen. Hooguit de Rivierdonderpad zal zich hierdoor minder gemakkelijk van paaigedrag laten weerhouden maar voor deze soort geldt dat vestiging onzeker is gelet op de eisen die deze soorten aan hard substraat stelt. Rivierprik, Barbeel en Kopvoorn zullen bij een debiet van 3% dus normaal gesproken niet opzwellen via de uitstroomopening om in de Groene Rivier te gaan paaien.

Het ontwerp van de instroom kan bij het vasthouden aan de 3% vuistregel worden aangepast (geknepen). Dit kan leiden tot voldoende lokstroom voor de Rivierdonderpad. Het is echter de vraag of het volume in dat geval nog voldoende zal zijn om de lokstroom op het Pannerdensch Kanaal voldoende merkbaar te laten zijn. Voor de Barbeel, Kopvoorn en Rivierprik zijn de stroomsnelheden hiervoor (bij bedvallende omstandigheden) te laag. Aanpassingen van het geulontwerp waardoor lokaal verhoogde stroomsnelheden ontstaan zal de situatie wellicht hooguit voor de Barbeel geschikt kunnen maken.

Bij het optrekken van het Groene Rivierdebiet naar 4,5 % verbetert de aantrekkelijkheid van het gebied voor stromingsminnende vissoorten aanzienlijk en vallen de lokstroom en de stroomsnelheid bij bedvallende omstandigheden binnen de bandbreedte van 2 van de 4 in het Inrichtingsplan genoemde doelsoorten. Knippen van de uitstroomopening is dan niet nodig. Aanpassingen van het geulontwerp waardoor lokaal verhoogde stroomsnelheden ontstaan, zal bij 4,5 % debiet, de situatie ook voor de meer kritische soorten (Kopvoorn en Rivierprik) geschikter maken maar ook in het laatste geval blijft voor deze soorten de situatie suboptimaal en is voor optimale omstandigheden eigenlijk een hogere stroomsnelheid en dus een debiet dat hoger is dan 4,5% wenselijk.

## 4 MORFOLOGISCHE EFFECTEN

### 4.1 Morfologische stabiliteit van de Groene Rivier

Bij de morfologische stabiliteit van de Groene kan onderscheid worden gemaakt in verticale stabiliteit (aanzanding en erosie van de geulbodem) en horizontale stabiliteit (neiging tot meandering door insnijding van de geuloevers).

Bij de verticale stabiliteit is de kritische stroomsnelheid voor het in beweging kunnen komen van het bodemmateriaal van belang. De vuistregel die voor een zandige bodem wordt gehanteerd is 0,2 tot 0,4 m/s aangehouden. In werkelijkheid is in nevengeulen echter veelal sprake van een zekere mate van cohesie van het zandige bodemmateriaal, als gevolg van 'cementering' van de zandkorrels met organisch, klei- en slibachtig materiaal. Hierdoor neemt de kritieke stroomsnelheid in de praktijk al gauw toe tot circa 0,5 tot 0,6 m/s (voor de voorgenomen aanleg van de nevengeulen bij de Maas wordt bijvoorbeeld ook steeds 0,6 m/s aangehouden).

De toename van de stroomsnelheid van circa 0,2 m/s naar 0,3 m/s bij bedvullende afvoer van de Groene Rivier, wanneer de onttrekking toeneemt tot 4,5 %, zal in de praktijk dus nog geen transport van betekenis van bodemmateriaal in de geul geven bij de meest voorkomende afvoeren. Alleen bij extremere hoogwaters kan enig transport optreden, zoals ook in andere reeds aangelegde nevengeulen: in die situatie speelt echter de grotere onttrekking door de inlaat geen rol meer, omdat de toevoer naar de Groene Rivier dan via de Pannerdensche Overlaat plaatsvindt en/of via zijdelingse uitwisseling over de zomerkade. Er kan in die weinig voorkomende situaties een zekere 'zelfreiniging' van de geul plaatsvinden door bodemtransport en oevererosie.

Bij het ontwerp van andere nevengeulen in het Rijntakkegebied (bijvoorbeeld de voorgenomen geul bij Vianen) wordt ook veelal getracht bij bedvormende afvoer een stroomsnelheid te creëren van circa 0,3 m/s, omdat dit enerzijds ecologisch gunstig is en anderzijds nog geen transport van bodemmateriaal veroorzaakt. De geul is daarbij morfologisch stabiel onder de meest voorkomende omstandigheden.

In samenhang met het voorgaande geldt ook dat horizontale stabiliteit gegarandeerd is, met uitzondering van de situatie bij extremere hoogwaters. De oevers kunnen dan wat eroderen, afhankelijk van de mate van begroeiing en de dikte van het kleidek op de oever. Beredeneerd vanuit het te realiseren natuurdoeltype (hoogdynamische riviernatuur) is dat niet ongewenst. Integendeel: ontstaan van hoogdynamische biotopen zoals oeverwallen is vanuit de natuurontwikkelingspotenties juist prima.

De praktijk wijst echter uit dat geulen in de uiterwaarden bij tijdelijke hoge stroomsnelheden tussen 1 en 2 m/s tijdens hoogwaters nauwelijks eroderen. Dit komt door de erosieremmende werking van de vegetatie en kleiafdekking op de oevers. Verder is bij de Groene Rivier sprake van een zekere afstand tot de bandijk, zodat monitoring van de oevererosie na hoogwater volstaat. Eventueel kan daarna correctief worden ingegrepen om verdere uitbochting bij volgende hoogwaters tegen te gaan, maar naar verwachting zal dit niet of slechts heel incidenteel hoeven te gebeuren.

Inmiddels zijn ook de resultaten van een nadere verkenning van de zandvang beschikbaar. Hieruit blijkt dat voor beide inlaatdebieten een kleine zandvang voldoende is om het meeste sediment af te vangen, waarbij zeker 10 jaar geen onderhoud nodig zal zijn. Voorwaarde is wel dat er een uitgekiende uitstroomvoorziening achter de inlaat komt (met stroomspreidende voorzieningen), zoals in de verkenning is aangegeven.

Voor de werking van deze zandvang is de onttrekking met 4,5 % niet sterk onderscheidend met een onttrekking van 3 %.

## 4.2 Aanzandingen Pannerdensch Kanaal

Er is een negental berekeningen uitgevoerd:

- drie referentiesituaties (zonder Groene Rivier) voor een drietal Bovenrijn afvoerniveaus (3910 m<sup>3</sup>/s, 2125 m<sup>3</sup>/s en 8000 m<sup>3</sup>/s);
- situatie met Groene Rivier bij Bovenrijnafvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s met 3% en 4,5 % onttrekking;
- situatie met Groene Rivier bij Bovenrijnafvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s met 3% en 4,5 % onttrekking;
- situatie met Groene Rivier bij Bovenrijnafvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s met 3% en 4,5 % onttrekking.

Opgemerkt wordt dat de onttrekkingen niet zijn gemodelleerd met een duiker, maar hard zijn opgelegd (en dus exact).

Uit de berekeningen blijkt, zoals verwacht, dat bij bedvullende omstandigheden in de Groene Rivier de stroomsnelheid bij 4,5 % onttrekking inderdaad toeneemt tot circa 0,3 m/s, ten opzichte van 0,2 m/s bij 3 % onttrekking. De stroomsnelheid op het Pannerdensch Kanaal neemt bij 4,5 % onttrekking circa 0,025 m/s extra af ten opzichte van 3 % onttrekking.

*(Voor de goede orde wijzen wij nog even op de definitie van linkerzijde van de rivier(en) en rechterzijde van de rivier(en); dit betreft zoals gebruikelijk de zijde(n) gezien in stroomrichting.)*

De morfologische analyse is uitgevoerd conform de methodiek zoals die door RIZA is ontwikkeld (RIZA, 2003<sup>1</sup>); hierbij vindt een weging plaats van effecten gedurende het laagwaterseizoen (karakteristieke Bovenrijnafvoer 2125 m<sup>3</sup>/s) en het hoogwaterseizoen (karakteristieke Bovenrijnafvoer 8000 m<sup>3</sup>/s). Verder heeft op aanwijzing van Rijkswaterstaat ON een middeling plaatsgevonden over een lengte van 300 m benedenstreams van de inlaat. In bijlage 2 zijn kaarten opgenomen van de absolute bodemhoogte bij een afvoer van 3 % en 4,5 %. Ook is in deze bijlage beschreven op welke wijze deze kaarten tot stand zijn gekomen.

Uit de morfologische analyse komen de volgende resultaten naar voren:

Volgens bovenstaande methode ligt de geschatte jaargemiddelde aanzanding in het Pannerdensch Kanaal in de orde van 0,2 m voor de linkerhelft (westzijde) van het kanaal (0,12 m gemiddeld over het dwarsprofiel) bij de 3% onttrekking. Door 4,5 % onttrekking neemt deze aanzanding toe met 0,07 m voor de linkerhelft (0,04 m gemiddeld over het dwarsprofiel). Deze toename is dus veel minder dan de reeds voorspelde aanzanding bij 3% onttrekking.

---

<sup>1</sup> Sieben, J.: *Morfologische effecten in de hoofdgeul*, RIZA Arnhem, wsr-memo 2003-024, oktober 2003.

Bij een afvoer van 4,5 % kan sprake zijn van geringe effecten op het stroombeeld in de vaargeul en voor de scheepvaart. De aanzanding in de hoofdgeul kan enige vermindering van de vaargeulafmetingen veroorzaken bij het voor de scheepvaart relevante afvoerregime.

Opgemerkt wordt dat er op het bovenste deel van het Pannerdensch Kanaal sprake is van een aanzienlijke overdiepte voor de scheepvaart. De berekende effecten op de scheepvaart bij een onttrekking van 4,5 % treden op langs de rand van de vaarweg en zijn gering.

## 5 CONCLUSIES

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat het knippen bij de instroom om aan de 3% debiet norm (oorspronkelijke ontwerpnorm) in de Groene Rivier te voldoen:

- Leidt tot minder hoogdynamische aan de rivier gekoppelde natuurwaarden;
- Stroomsnelheden, waarbij de gewenste paaigebieden voor stromingsminnende vissoorten niet conform het streefbeeld kunnen worden gerealiseerd;
- De natuurdoelstellingen uit het Beheersplan niet conform het gewenste niveau kunnen worden gehaald;
- Er een geschatte gemiddelde jaarlijkse aanzanding optreedt van 0,3-0,4 m.

Het toelaten van 4,5% debiet in de Groene Rivier heeft de volgende effecten:

- De snelheden in de Groene Rivier met 50% worden verhoogd van 0,2 tot 0,3 m/s;
- Creëren van meer hoogdynamische aan de rivier gekoppelde natuurwaarden, passend bij de doelstellingen uit het Beheersplan;
- Een lokstroom en stroomsnelheden, passend bij het ecologisch profiel van zeker 2 van de 4 gewenste stromingsminnende vissoorten;
- Een marginale extra aanzanding (profielgemiddeld 0,04 m en gemiddeld over de linkerhelft van de rivier 0,07 m) op het Pannerdensch Kanaal. Bij een afvoer van 4,5 % kan sprake zijn van een gering effect op de scheepvaart door aanzanding in de vaarweg.

## 6 LITERATUURLIJST

[1] De Joode, A., *Groene Rivier Pannerden rivierkundige toets*, no. 057.25.2006001, Arnhem: Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 26 april 2006.

[2] Sieben, J., *Morfologische effecten in de hoofdgeul*, wsr-memo 2003-024, Arnhem: RIZA, 7 oktober 2003.

## **Bijlage 1**

# **Technische beschrijving morfologische berekeningen**

## 1. MODEL OPZET

### 1.1 WAQUA model

Om de effecten op de waterbeweging en bodemveranderingen in te schatten worden met behulp van het hydraulische model WAQUA verschillende 3% en 4,5% scenario's doorgerekend.

De stroom van water de Groene Rivier in is zodanig geschematiseerd in WAQUA dat een beperkte afvoer (3% van de afvoer door het Pannerdensch Kanaal) richting de uiterwaard wordt gestuurd. Dit wordt gedaan door middel van een onttrekking aan de zijde van de hoofdgeul en een lozing direct achter de kade. Op deze wijze is precies 3% in het model te brengen. De 3% geldt bij een afvoer waarbij de geul in de Groene Rivier gevuld is tot het maaiveld [1]. Hierbij hoort een afvoer van 1274 m<sup>3</sup>/s op het Pannerdensch Kanaal en een afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s op de Boven Rijn. Op een zelfde wijze kan er exact 4,5% onttrokken worden aan de hoofdgeul en ingebracht worden in de nevengeul. Omwille van de vergelijkbaarheid, wordt dit ook bij een afvoer van 1274 m<sup>3</sup>/s op het Pannerdensch Kanaal gedaan.

### 1.2 Scenario's

#### *Berekeningen voor hydrodynamische analyse*

Eerst wordt het effect bekeken van een vergroting van de doorstroming van het debiet van 3% door de Groene Rivier naar 4,5% door de Groene Rivier. Deze doorstroming vindt plaats bij bedvullende afvoer door de Groene Rivier. Voor de hydrodynamische analyse zijn de volgende WAQUA berekeningen uitgevoerd (hierbij is gebruik gemaakt van een spreadsheets, welke iets afwijkt van de afvoerverdeling Rijntakken 2001. 1, maar dit heeft voor de uitkomsten geen betekenis):

1. Referentie situatie (zonder Groene Rivier) waarbij een afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s bij Lobith opgelegd is;
2. Situatie met Groene Rivier waarbij een Boven Rijn afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s opgelegd is en 3% van de afvoer op het Pannerdensch Kanaal richting de uiterwaard gestuurd wordt (3% van 1274 is 38 m<sup>3</sup>/s);
3. Situatie met Groene Rivier waarbij een Boven Rijn afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s opgelegd is en 4,5% van de afvoer op het Pannerdensch Kanaal richting de uiterwaard gestuurd wordt (4,5% van 1274 is 58 m<sup>3</sup>/s).

#### *Berekeningen voor morfologische analyse*

Vervolgens worden de morfologische effecten van een debietvergroting in de nevengeul onderzocht aan de hand van optredende snelheidsverschillen in de hoofdgeul. Het doel is het in kaart brengen van de lange termijn evenwichtsituatie. Hiertoe is reeds onderzoek verricht door RIZA in de Afferdensch en Deestsche Waarden [2]. Het inschatten van bodemveranderingen ten gevolge van uiterwaardmaatregelen is volgens deze methode gebaseerd op drie componenten (a) representatief afvoerverloop, (b) de relatieve hydraulische veranderingen in het zomerbed, en (c) het relaxatiegedrag van lokale bodemveranderingen in het zomerbed. Ten einde een representatief afvoerverloop te schematiseren wordt conform deze aanpak een berekening gemaakt voor een afvoer voor de laagwaterperiode (Boven Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s) en de hoogwaterperiode (Boven Rijn afvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s).

Voor de morfologische analyse zijn de volgende WAQUA berekeningen uitgevoerd:

4. Referentiesituatie (zonder Groene Rivier) met een Boven Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s;
5. Referentiesituatie (zonder Groene Rivier) met een Boven Rijn afvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s;
6. Situatie met Groene Rivier met een Boven Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s en een afvoer van 678 m<sup>3</sup>/s door het Pannerdensch Kanaal waarbij 15 m<sup>3</sup>/s afstroomt naar de Groene Rivier;
7. Situatie met Groene Rivier met een Boven Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s en een afvoer van 678 m<sup>3</sup>/s door het Pannerdensch Kanaal waarbij 22 m<sup>3</sup>/s afstroomt naar de Groene Rivier;
8. Situatie met Groene Rivier met een Boven Rijn afvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s en een afvoer van 2676 m<sup>3</sup>/s door het Pannerdensch Kanaal waarbij 55 m<sup>3</sup>/s afstroomt naar de Groene Rivier;
9. Situatie met Groene Rivier met een Boven Rijn afvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s en een afvoer van 2676 m<sup>3</sup>/s door het Pannerdensch Kanaal waarbij 80 m<sup>3</sup>/s afstroomt naar de Groene Rivier.

Ter toelichting op bovenstaande:

De afvoer naar de Groene Rivier voor het laagwaterseizoen is analoog aan [1] bepaald aan de hand van de waterstand op de hoofdgeul (kvr PK870) en de afmetingen van de duiker. Voor het 4,5% scenario is deze afvoer met een factor 4,5/3 verhoogd. Voor de afvoer naar de Groene Rivier voor het hoogwaterseizoen is het maximale debiet dat door het inlaatkunstwerk kan stromen aangehouden, dit is 55 m<sup>3</sup>/s. Voor het 4,5% scenario is deze afvoer tevens met een factor 4,5/3 verhoogd. De kenmerkende afvoer bij het laagwaterseizoen is overigens niet een vaste maat: deze kan voor het Pannerdensch Kanaal anders liggen dan voor de Waal. Doordat de uiterwaard pas gaat meestromen bij een hogere afvoer, zou de kenmerkende laagwaterafvoer ook hoger kunnen liggen. Daar staat echter tegenover dat de Groene Rivier ook bij een Boven Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s reeds goed mee stroomt en daarmee zijn effect op het Pannerdensch Kanaal uitoefent. Omdat de methode voor de Waal met succes is toegepast, zijn hier daarom de kenmerkende afvoeren zoals bij de Waal gebruikt. Teneinde enig gevoel te krijgen voor de realiteitswaarde van de uitkomsten, is ook op directe wijze de aanzanding bij bedvallende afvoer (Boven Rijn afvoer 3910 m<sup>3</sup>/s) bepaald. Deze berekening is minder genuanceerd, maar sluit wel meer aan op de ervaringspraktijk. De resultaten hiervan liggen in eenzelfde orde van grootte (zie verder).

#### *Gebruikersdoeleinden en beperkingen*

De vigerende WAQUA schematisatie voor het deel met daarin de Groene Rivier gekalibreerd op hoge afvoeren (>10.000 m<sup>3</sup>/s). Wanneer met dit model lage afvoeren worden doorgerekend zijn de in het model gebruikte ruwheden in feite te hoog. Dit beïnvloedt het stroombeeld en het verhang over de rivier. De waterstanden op de benedenstroomse rand zijn enkele centimeters verlaagd, dit is dusdanig gedaan dat waterstanden bij de instroomlocatie van de Groene Rivier (kvr PK870) overeenkomen met bestaande Qh-relaties. Deze verlaging van enkele centimeters is relatief weinig ten opzichte van de waterdiepte. Dit brengt echter wel met zich mee dat modelresultaten nabij de benedenstroomse rand minder representatief zijn.

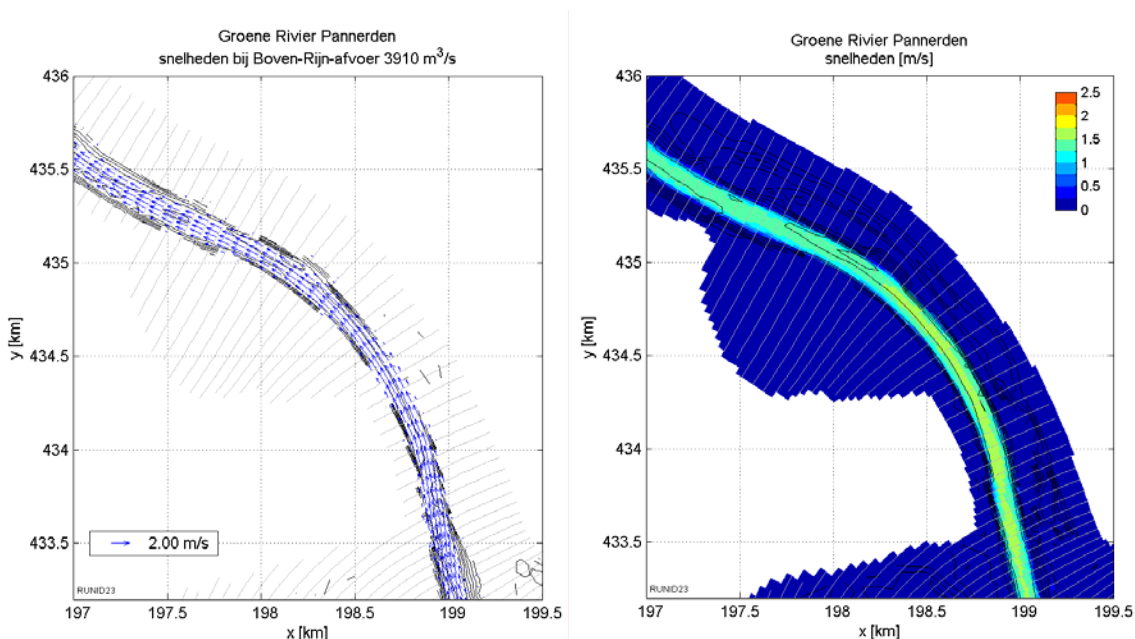
Opgemerkt wordt verder dat de nadruk hier ligt op de voorspelling van het verschil in aanzanding tussen 3 % en 4,5 % onttrekking, omdat de benaderende berekeningsmethoden betrouwbaarder zullen zijn voor een verschil bepaling dan voor een absolute bepaling.

Verder wordt, na overleg met RWS DON, een middeling toegepast van de bodemveranderingen over een lengte van 300 m iets benedenstrooms (dit is circa 2 maal de rivierbreedte, wat als kenmerkende lengte voor de aanzanding kan worden beschouwd) vanaf de inlaatlocatie én over de breedte van de rivier. Om de erosie direct nabij de inlaat hierin niet mee te nemen, begint het middelingsvak net benedenstrooms van de erosiekuil bij de inlaat. Door deze middeling worden zeer locale effecten afgevlakt en ontstaat een betere vergelijkingsbasis met de uitkomsten van de 1D-modellen die tot dusverre worden toegepast bij de voorspelling van de aanzanding. De kleurenplots geven, in aanvulling daarop, inzicht in de ruimtelijke verdeling van de aanzanding.

## 2. RESULTATEN HYDRAULISCHE ANALYSE

### Resultaten - Strooming referentie situatie

Hieronder wordt het stromingsbeeld weergegeven voor het Pannerdensch Kanaal in de referentiesituatie. Bij een afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s op de Boven Rijn en 1274 m<sup>3</sup>/s op het Pannerdensch Kanaal zijn de stroomsnelheden op het Pannerdensch Kanaal orde 1,5 m/s. In de uiterwaarden stroomt in die situatie geen water (zie Figuur 1).

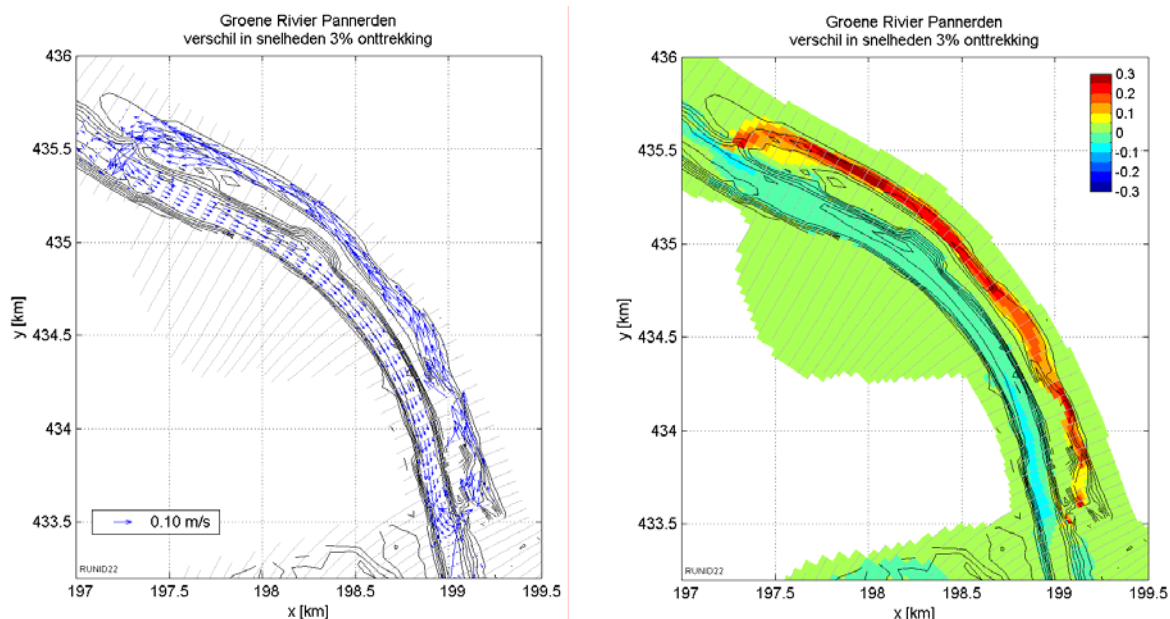


Figuur 1: Stroomsnelheden op Pannerdensch Kanaal voor referentie situatie. Links: Richting en grootte stroomsnelheid in vectoren. Rechts: Grootte stroomsnelheid in kleurschaal

### Resultaten - Strooming situatie 3% onttrekking

Wanneer 3% van de afvoer van de hoofdgeul naar de Groene Rivier gestuurd wordt veranderd het stroombeeld. Het verschil in stroombeeld is weergegeven in Figuur 2a. Dit laat zien dat de stroomsnelheden in de hoofdgeul iets afgenomen zijn en dat de uiterwaard (Groene Rivier) nu ten opzichte van de referentiesituatie meestroomt. De toename in stroomsnelheid is in de uiterwaarden orde 0,2 m/s en de afname in de hoofdgeul is kleiner dan circa 0,05 m/s (zie Figuur 2 – rechts–).

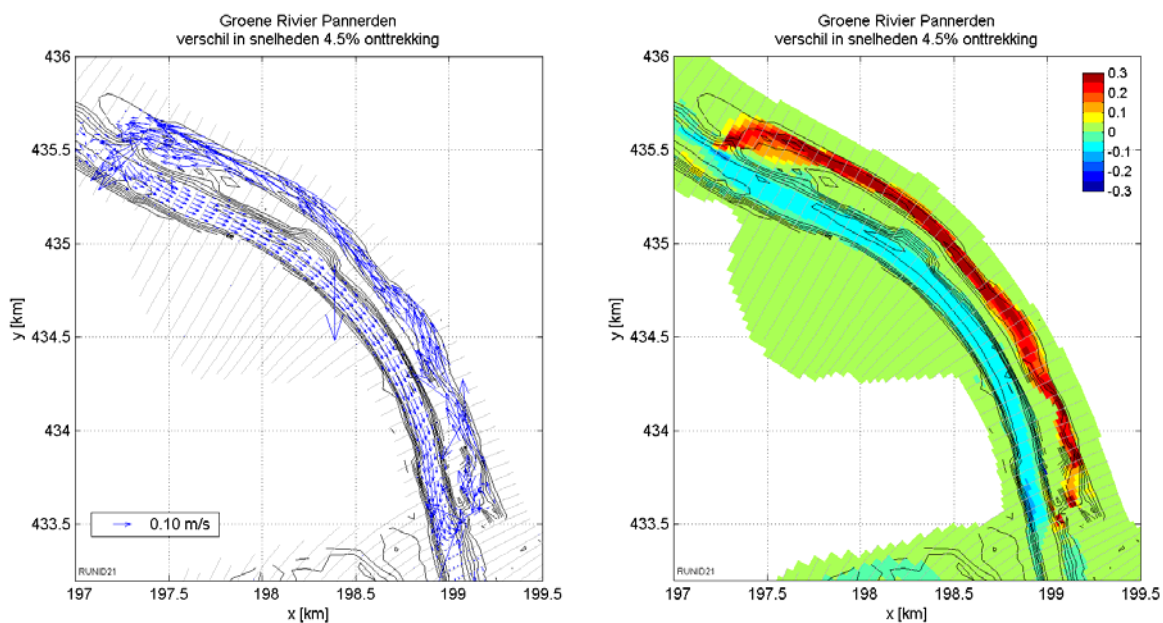
Het verschil in stroomsnelheden tussen de referentiesituatie en de situatie met 3% onttrekking geeft tevens de absolute stroomsnelheden in de Groene Rivier weer omdat in de referentie situatie geen water in de uiterwaard stroomt. Hieruit blijkt dat de stroomsnelheid in de Groene Rivier dus orde 0,2 m/s is.



**Figuur 2: Verschillen in stroomsnelheden voor Pannerdensch Kanaal en Groene Rivier voor de situatie met 3% onttrekking. Links: Richting en grootte verschillen in vectoren. Rechts: Grootte verschillen in kleurschaal**

### Resultaten - Strooming situatie 4,5% onttrekking

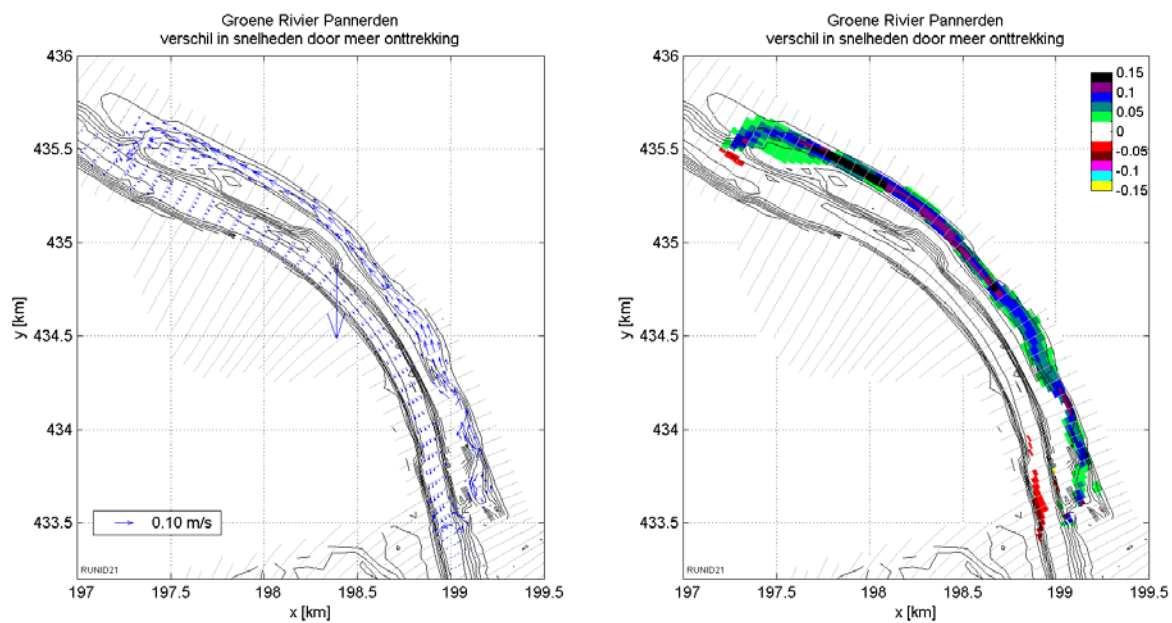
Wanneer 4,5 % van de afvoer van de hoofdgeul naar de Groene Rivier gestuurd wordt stroomt de Groene Rivier harder mee. Hierdoor nemen verschillen in stroomsnelheden ten opzichte van de referentie situatie in de uiterwaarden en op het Pannerdensch Kanaal toe. De toename in stroomsnelheid is in de uiterwaarden orde 0,3 m/s en de afname in de hoofdgeul is orde 0,05 tot 0,10 m/s (zie Figuur 3). Hieruit blijkt tevens dat de stroomsnelheid in deze situatie in de Groene Rivier orde 0,3 m/s is.



**Figuur 3: Verschillen in stroomsnelheden voor Pannerdensch Kanaal en Groene Rivier voor de situatie met 4,5% onttrekking. Links: Richting en grootte verschillen in vectoren. Rechts: Grootte verschillen in kleurschaal**

### **Verschil in stroomsnelheden ten gevolge van 4,5% ten opzichte van 3% onttrekking**

De verschillen in stroomsnelheden tengevolge van 4,5% onttrekking in plaats van 3% onttrekking laten zich kenmerken door een toename in stroomsnelheden in de Groene Rivier en een marginale afname in stroomsnelheid op het Pannerdensch Kanaal. Op het Pannerdensch Kanaal nemen stroomsnelheden met niet meer dan circa 0,025 m/s af (zie Figuur 4). Door de debietvergroting worden de stroomsnelheden in de Groene Rivier echter aanzienlijk verhoogd (orde 0,1 m/s).



**Figuur 4: Verschillen in stroomsnelheden tussen situatie met 4,5% en 3% onttrekking. Links: Richting en grootte verschillen in vectoren. Rechts: Grootte verschillen in kleurschaal**

### 3. RESULTATEN MORFOLOGISCHE ANALYSE

#### Evenwichtswaarden van bodemverandering

De morfologische effecten van een debietvergroting worden onderzocht aan de hand van optredende snelheidsverschillen in de hoofdgeul. Het inschatten van bodemveranderingen ten gevolge van snelheidsverschillen veroorzaakt door uiterwaardenmaatregelen gebeurt volgens een eerder door RIZA gebruikte methode [2].

Evenwichtswaarden van bodemveranderingen  $\Delta z_{eh}$  en  $\Delta z_{el}$  in het hoog- en laagwaterseizoen zijn als volgt gedefinieerd.

$$\Delta z_e = -a_{excl.plan} \frac{u_{incl.plan} - u_{excl.plan}}{u_{excl.plan}} \quad (\text{Verg. 1})$$

met

- $\Delta z_e$  : evenwichtswaarde bodemverandering
- $a_{excl.plan}$  : lokale waterdiepte in referentie situatie
- $u_{excl.plan}$  : lokale stroomsnelheid in referentie situatie
- $u_{incl.plan}$  : lokale stroomsnelheid in aangepaste situatie

Representatieve statistische jaarlijks gemiddelde parameters voor de bodemveranderingen worden als volgt gedefinieerd.

$$\Delta z_m = \frac{\Delta z_{eh}}{2} (1-f) + \frac{\Delta z_{el}}{2} (1+f) \quad ; \quad f = \left( \frac{e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}} - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}}}{1 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}} - e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}}} \right) \quad (\text{Verg. 2})$$

$$\sigma = \frac{(\Delta z_{eh} - \Delta z_{el})}{2\sqrt{3}} \left| \frac{2 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}} - e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}}}{1 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}} - e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}}} - 1 \right| \quad (\text{Verg. 3})$$

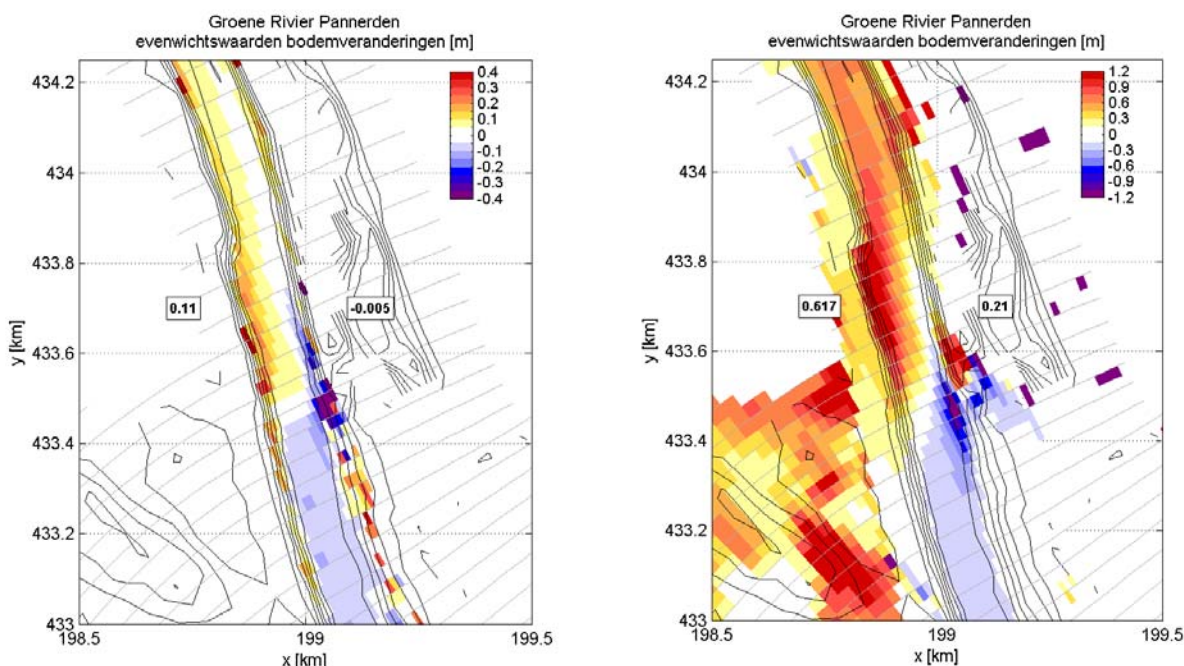
met

- $\Delta z_m$  : jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering
- $\sigma$  : standaardafwijking van jaarlijks gemiddelde
- $\Delta z_{eh}$  : evenwichtswaarde bodemverandering hoogwaterseizoen
- $\Delta z_{el}$  : evenwichtswaarde bodemverandering laagwaterseizoen
- $T_h, T_l$  : duur hoogwaterseizoen en duur laagwaterseizoen
- $T_{mh}, T_{ml}$  : morfologische tijdschaal voor het hoog- en laag waterseizoen

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 2 wordt analoog aan Sieben 2003 [2] het laagwaterseizoen geschematiseerd door een debiet van 2125 m<sup>3</sup>/s op de Boven Rijn, en het hoogwaterseizoen door middel van een debiet van 8000 m<sup>3</sup>/s op de Boven Rijn. Voor beide seizoenen worden de evenwichtswaarden voor de bodemveranderingen bepaald ten gevolge van de aanleg van de Groene Rivier.

### Evenwichtswaarde bodemveranderingen situatie 3% onttrekking

De berekende waarden voor  $\Delta z_{el}$  en  $\Delta z_{eh}$  zijn weergegeven in Figuur 5. De gele en rode kleuren geven sedimentatie aan als gevolg van afname in stroomsnelheid ten gevolge van het plan, de blauwe kleuren geven erosie aan als gevolg van toename in snelheid. Nb: men dient enkel aandacht te besteden aan de effecten die optreden in de hoofdgeul: doordat in de referentie- situatie geen water door de uiterwaarden stroomt, treden hier onrealistisch hoge waarden op. Verder wordt de verandering aan de bovenstroomse zijde het meest relevant geacht omdat morfologische verandering zich stroomafwaarts verplaatsen. Daarom is hier slechts dit deel van de nevengeul en Pannerdensch Kanaal weergegeven.



**Figuur 5: Evenwichtswaarden bodemveranderingen voor Links: het laagwaterseizoen (Boven Rijn 2125 m<sup>3</sup>/s). Rechts: het hoogwater seizoen (Boven Rijn 8000 m<sup>3</sup>/s)**

De belangrijkste conclusies die op basis van Figuur 5<sup>2</sup> getrokken kunnen worden zijn:

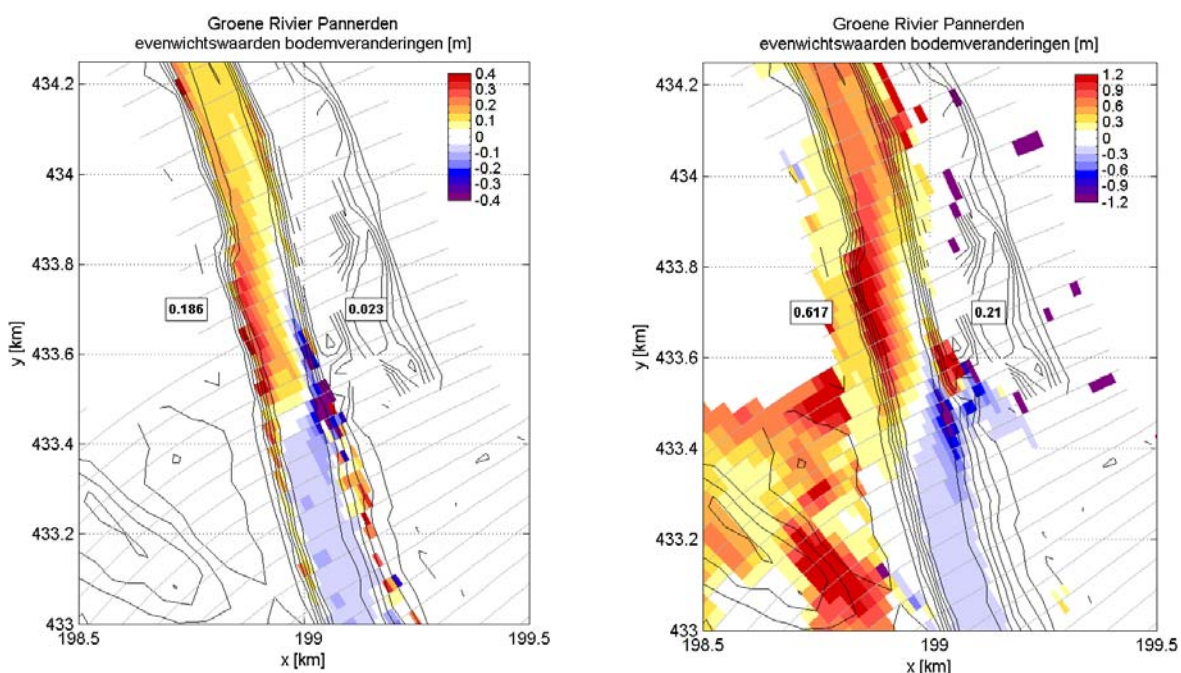
- Ten gevolge van de instroom van water naar de Groene rivier is er een lokale toename in snelheden aan de rechterzijde van het Pannerdensch Kanaal, zowel gedurende het laagwaterseizoen als het hoogwaterseizoen. Volgens bovengenoemde relatie leidt deze toename tot erosie (blauwe vlek rechts onderin in Figuur 5). Deze lokale effecten ten gevolge van de instroom naar de Groene Rivier, concentreren zich over een lengte van ongeveer een kilometer op de hoofdgeul. De verschuiving van snelheden vertaalt zich tegelijkertijd ook in een afname van stroomsnelheden aan de linkerkant van de rivier.

<sup>2</sup> NB alle evenwichtswaarden in de figuren zijn niet verdisconteerd middels de duur van het laag- en hoogwaterseizoen en geven daarom geen absoluut effect weer.

- Gemiddeld over een lengte van 300 m, bedraagt de evenwichtswaarde voor de aanzanding aan de linkerkant van de rivier tijdens laagwater ten gevolge van het plan circa 0,11 m. De evenwichtswaarde voor aanzanding tijdens hoogwater wordt geschat op circa 0,62 m.
- De evenwichtswaarde aan de rechterzijde van de rivier tijdens laagwater ten gevolge van het plan wordt geschat op -0,01m. De evenwichtswaarde aan de rechterzijde tijdens hoogwater wordt geschat op circa 0,21 m.

### Evenwichtswaarde bodemveranderingen situatie 4.5% onttrekking

De berekende waarden voor  $\Delta z_{el}$  en  $\Delta z_{eh}$  ten gevolge van het gewijzigde plan met een verhoging van het instroomdebiet zijn weergegeven in Figuur 6.



**Figuur 6: Evenwichtswaarden bodemveranderingen voor Links: het laagwaterseizoen (Boven Rijn 2125 m<sup>3</sup>/s). Rechts: het hoogwater seizoen (Boven Rijn 8000 m<sup>3</sup>/s)**

De belangrijkste conclusies die op basis van Figuur 6 getrokken kunnen worden zijn:

- Ten gevolge van de het verhoogde instroomdebiet is er een verdere toename in stroomsnelheden aan de rechterzijde van het Pannerdensch Kanaal, met name gedurende het laagwaterseizoen (blauwe vlek rechts onderin in Figuur 6). Dit vertaalt zich tegelijkertijd ook in een verdere afname van stroomsnelheden aan de linkerkant van de rivier.
- De lokale effecten ten gevolge van de instroom van water de Groene Rivier in concentreren zich wederom over een lengte van ongeveer een kilometer op de hoofgeul.

- De evenwichtswaarde voor de aanzanding aan de linkerkant van de rivier tijdens laagwater ten gevolge van het plan met een verhoogd instroomdebiet wordt geschat op 0,19 m. De evenwichtswaarde voor aanzanding tijdens hoogwater blijft onveranderd op 0,62 m.
- De evenwichtswaarde aan de rechterzijde van de rivier tijdens laagwater ten gevolge van het plan wordt geschat op 0,02 m. De evenwichtswaarde aan de rechterzijde tijdens hoogwater wordt geschat op 0,21 m.

### Jaargemiddeld effect

De geschatte evenwichtswaarden uit de vorige paragrafen zijn niet representatief voor de gemiddelde verwachte bodemverandering. Deze wordt geschat met eerder genoemde vergelijking (Verg. 2). Hiervoor zijn de volgende variabelen gebruikt. Nb evenwichtswaarden zijn bepaald op de instroom locatie voor de groene rivier.

**Tabel 1: Overzicht variabelen**

	eenheid	hoogwaterseizoen	laagwaterseizoen
Duur	dg	15	350
voortplantingssnelheid $c$	m/dg	10	2
Morfologische tijdschaal $T=L/c$	dg	1000/10=100	1000/2=500
(3% scenario)			
evenwichtswaarde linkershelft	m	+0,62	+0,11
evenwichtswaarde rechterhelft	m	+0,21	-0,01
(4,5% scenario)			
evenwichtswaarde linkershelft	m	+0,62	+0,19
evenwichtswaarde rechterhelft	m	+0,21	+0,02

Als dit wordt ingevuld in (Verg. 2) en (Verg. 3) leidt dit tot een jaargemiddelde aanzanding van  $\Delta z_m = 0,18\Delta z_{eh} + 0,82\Delta z_{el}$  en een variatie van  $\sigma = 0,035(\Delta z_{eh} - \Delta z_{el})$ . Met de evenwichtswaarden uit volgt dan de geschatte jaargemiddelde bodemverandering.

**Tabel 2: Jaargemiddelde bodemverandering voor het 3% scenario**

	eenheid	linkershelft zomerbed	rechterhelft zomerbed	gemiddeld zomerbed
jaargemiddelde bodemverandering	m	+0,20	+0,03	+0,12
jaarlijkse standaardafwijking	m	0,03	0,01	0,02

**Tabel 3: Jaargemiddelde bodemverandering voor het 4,5% scenario**

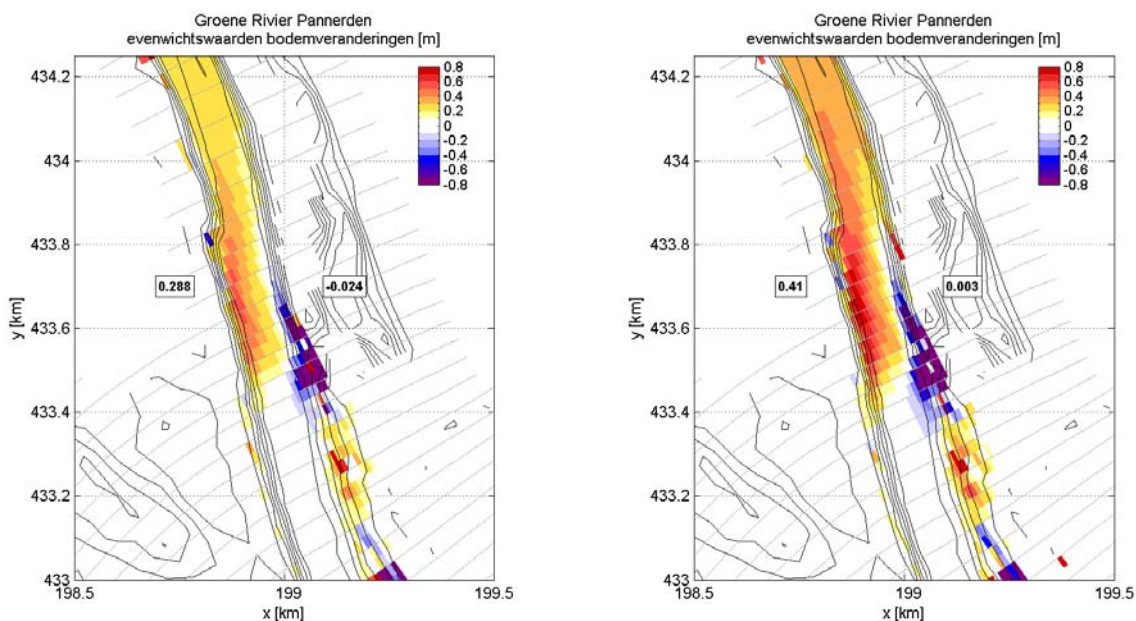
	eenheid	linkershelft zomerbed	rechterhelft zomerbed	gemiddeld zomerbed
jaargemiddelde bodemverandering	m	+0,27	+0,05	+0,16
jaarlijkse standaardafwijking	m	0,02	0,01	0,02

Uit voorgaande blijkt ondermeer dat verschillen in aanzanding als gevolg van de grotere onttrekking vooral tijdens het laagwaterseizoen optreden. Bij hoogwater verschillen de stroomsnelheden voor het 3% en 4,5% scenario namelijk niet ten opzichte van de referentie situatie. De geschatte jaargemiddelde aanzanding, gemiddeld over het dwarsprofiel bedraagt 0,12 m (voor de linkerhelft van het dwarsprofiel 0,20 m). Voor het 4,5% scenario is de profielgemiddelde aanzanding 0,04 m hoger dan voor het 3% scenario (voor de linkerhelft van het dwarsprofiel 0,07 m).

Deze veranderingen zijn weliswaar niet verwaarloosbaar, maar ze zijn marginaal ten opzichte van de totale morfodynamiek van het Pannerdensch Kanaal (zoals de autonome bodemdaling, welke hiermee een stukje wordt tegengegaan over het traject van de Groene Rivier). Verder moet worden opgemerkt dat er op het bovenste deel van het Pannerdensch Kanaal sprake is van een aanzienlijke overdiepte voor de scheepvaart. De kleine extra gemiddelde aanzanding kan een geringe beperking aan de scheepvaart geven.

### Globale check met Boven Rijn afvoer 3910 m<sup>3</sup>/s

Om een enig gevoel te krijgen van de realiteitswaarde van voorgaande voorspellingen, is hierna een check uitgevoerd door het berekenen van de aanzanding met een Boven Rijn afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s. Hierbij is dezelfde middelingsprocedure toegepast als hiervoor. Dit geeft de volgende resultaten.



**Figuur 7: Evenwichtswaarden bodemveranderingen voor Boven Rijn 3910 m<sup>3</sup>/s Links: 3% onttrekking. Rechts: 4,5% onttrekking**

In getalsvorm geeft dit de volgende uitkomsten.

**Tabel 4: Jaargemiddelde bodemverandering voor het 3% scenario**

	eenheid	linkerhelft zomerbed	rechterhelft zomerbed	gemiddeld zomerbed
jaargemiddelde bodemverandering	m	+0,29	-0,02	+0,14

**Tabel 5: Jaargemiddelde bodemverandering voor het 4,5% scenario**

	eenheid	linkerhelft zomerbed	rechterhelft zomerbed	gemiddeld zomerbed
jaargemiddelde bodemverandering	m	+0,41	0,00	+0,21

Deze waarden zijn iets groter dan berekend volgens de hiervoor gehanteerde methode, maar zijn wel van eenzelfde orde van grootte. De eerder gehanteerde methode lijkt dus goed toepasbaar. Een dergelijke aanwijzing volgt ook uit de met de methode voorspelde 3% waarden van de aanzanding: deze bedraagt minder dan 2 decimeter, wat ligt in een orde van grootte zoals op basis van ervaring is te verwachten.

#### 4. CONCLUSIES

In de voorgaande analyse is de invloed op de hydrodynamica en de morfologie ten gevolge van een verhoging van het instroomdebiet naar de Groene Rivier vastgesteld. De volgende punten worden geresumeerd.

##### Ten aanzien van de hydraulica:

- Wanneer 3% van de bedvullende afvoer door het Pannerdensch Kanaal naar de Groene Rivier afstroomt, zijn de stroomsnelheden in de Groene Rivier orde 0,20 m/s;
- Wanneer 4,5% van de bedvullende afvoer door het Pannerdensch Kanaal naar de Groene Rivier afstroomt, zijn de stroomsnelheden in de Groene Rivier orde 0,30 m/s;
- Door de debietvergroting worden de stroomsnelheden in de Groene Rivier dus aanzienlijk verder vergroot (orde 0,1 m/s), wat in belangrijke mate bijdraagt aan de ecologische doelstelling van de Groene Rivier;
- Op het Pannerdensch Kanaal nemen ten gevolge van een verhoging van het instroomdebiet stroomsnelheden met niet meer dan 0,025 m/s verder af.

##### Ten aanzien van de morfologie:

- Het morfologische effect van de ingreep wordt vooral tijdens het laagwaterseizoen bepaald. Bij hoogwater verschillen de stroomsnelheden voor het 3% en 4,5% scenario namelijk niet noemenswaardig ten opzichte van de referentie situatie;
- Ten gevolge van de instroom van water naar de Groene rivier is er een lokale toename in snelheden aan de rechterzijde (gezien in stroomrichting) van het Pannerdensch Kanaal, zowel gedurende het laagwaterseizoen als het hoogwaterseizoen. Deze verschuiving van snelheden vertaalt zich tegelijkertijd ook in een afname van stroomsnelheden, welke vooral aan de linkerzijde van de rivier is waar te nemen;
- De afname in stroomsnelheid leidt tot sedimentatie aan de linkerkant van de hoofdgeul;
- Een toename in stroomsnelheid leidt tot erosie aan de rechterkant van de hoofdgeul;
- De geschatte jaargemiddelde aanzanding op het Pannerdensch Kanaal nabij de locatie van de instroom van de Groene Rivier liggen in de orde van 0,20 m voor de linkerhelft van het dwarsprofiel en 0,12 m gemiddeld over het dwarsprofiel; dit ligt in de te verwachten orde van grootte. Een check van de sedimentatie voor een permanente Boven Rijn afvoer van 3910 m<sup>3</sup>/s geeft wat grotere waarden, maar deze zijn wel van een vergelijkbare orde van grootte. De methodiek lijkt daarmee goed toepasbaar;
- Voor het 4,5% scenario liggen de absolute bodemveranderingen gemiddeld zo'n 0,07 m (linkerhelft) of 0,04 m hoger dan het 3% scenario. Dit is als marginaal te beschouwen ten opzichte van de algehele morfodynamiek van het Pannerdensch Kanaal. Bovendien is er op het bovenstroomse deel van het Pannerdensch Kanaal sprake van een belangrijke overdiepte voor de scheepvaart. Een extra gemiddelde aanzanding van enige centimeters bij een afvoer van 4,5 % zal naar verwachting geen geringe beperkende invloed hebben op de scheepvaart ten opzichte van een afvoer van 3 %.

A COMPANY OF



**ROYAL HASKONING**

## **Bijlage 2**

### **Kaarten bodemhoogten instroompening**

## 1. Inleiding

Ten behoeve van de morfologische analyse zijn er WAQUA berekeningen uitgevoerd:

- Referentie situatie zonder Groene Rivier bij laag water (Boven-Rijn afvoer van 2125 m<sup>3</sup>/s);
- Referentie situatie zonder Groene Rivier bij hoog water (Boven-Rijn afvoer van 8000 m<sup>3</sup>/s);
- Situatie laag water (afvoer 2125 m<sup>3</sup>/s) waarbij 3 % (15 m<sup>3</sup>/s) afstroomt naar de Groene Rivier;
- Situatie laag water (afvoer 2125 m<sup>3</sup>/s) waarbij 4,5% (22 m<sup>3</sup>/s) afstroomt naar de Groene Rivier;
- Situatie hoog water (afvoer 8000 m<sup>3</sup>/s) waarbij 3 % (55 m<sup>3</sup>/s) afstroomt naar de Groene Rivier;
- Situatie hoog water (afvoer 8000 m<sup>3</sup>/s) waarbij 4,5% (80 m<sup>3</sup>/s) afstroomt naar de Groene Rivier.

De uitvoer uit bovenstaande berekeningen (stroomsnelheid en waterdiepte bij genoemde omstandigheden voor elke WAQUA rooster cel) is als invoer gebruikt in morfologische sommen om de evenwichtswaarde bodemverandering (aanzanding of erosie) in meters te berekenen (bij 3% en 4,5% onttrekking) bij een laagwater (delta\_z\_el) en bij hoogwater (delta\_z\_eh). Daarvoor is de onderstaande formule gebruikt (zie Verg.1).

$$\Delta z_e = -a_{excl.plan} \frac{u_{incl.plan} - u_{excl.plan}}{u_{excl.plan}} \quad (\text{Verg. 4})$$

met

- $\Delta z_e$  : evenwichtswaarde bodemverandering
- $a_{excl.plan}$  : lokale waterdiepte in referentie situatie
- $u_{excl.plan}$  : lokale stroomsnelheid in referentie situatie
- $u_{incl.plan}$  : lokale stroomsnelheid in aangepaste situatie

De evenwichtswaarden bodemverandering voor elk WAQUA rooster cel zijn weggeschreven naar outputbestanden (in \*.txt formaat) met de velden delta\_z\_e, m, n.

Om te komen tot een jaargemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering (delta\_z\_m) moeten de evenwichtswaarde bodemverandering bij laagwater (delta\_z\_el) en de evenwichtswaarde bovenverandering bij hoogwater (delta\_z\_eh) ingevuld worden in de volgende formule (zie Verg.2):

$$\Delta z_m = \frac{\Delta z_{eh}}{2} (1 - f) + \frac{\Delta z_{el}}{2} (1 + f) \quad ; \quad f = \left( \frac{e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}} - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}}}{1 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}} - \frac{T_h}{T_{mh}}}} \right) \quad (\text{Verg. 5})$$

$$\sigma = \frac{(\Delta z_{eh} - \Delta z_{el})}{2\sqrt{3}} \left| \frac{2 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}}} - e^{-\frac{T_h}{T_{mh}}}}{1 - e^{-\frac{T_l}{T_{ml}} - \frac{T_h}{T_{mh}}}} - 1 \right| \quad (\text{Verg. 6})$$

met

- $\Delta z_m$  : jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering

$\sigma$	: standaardafwijking van jaarlijks gemiddelde
$\Delta z_{eh}$	: evenwichtswaarde bodemverandering hoogwaterseizoen
$\Delta z_{el}$	: evenwichtswaarde bodemverandering laagwaterseizoen
$T_h, T_l$	: duur hoogwaterseizoen en duur laagwaterseizoen
$T_{mh}, T_{ml}$	: morfologische tijdschaal voor het hoog- en laag waterseizoen

## 2. Opstellen kaarten

Studie gebied is 1 km lang rondom het instroompunt van de Groene Rivier Pannerden (rivierkilometer 869-870).

Stap 1. De berekende delta\_z\_el en delta\_z\_eh voor de scenario's 3% en 4,5 % onttrekking omzetten van \*.txt naar dbf bestand. In ArcView met m en n als unieke ID om de deltaZ waarde te linken aan het WAQUA rooster (vlakken bestand). Dit WAQUA rooster+deltaZ waarde wordt vervolgens omgezet naar een grid bestand.

Stap 2. Via een grid calculatie met de resulterende grids uit stap 1 een grid met de waarde van de jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering (delta\_z\_m) berekenen voor de scenario's 3 en 4,5 % onttrekking door verg. 2 in te vullen. Daarbij worden de volgende waarden verondersteld:  
 $f = 0,64$  (zie voor berekening Excel bestand  
*berekening\_jaargemiddeld\_morfologisch\_effect.xls*)

Naam grid	Berekende waarde
	<i>Scenario 3%</i>
dzeh3	evenwichtswaarde bodemverandering hoogwaterseizoen
dzel3	evenwichtswaarde bodemverandering laagwaterseizoen
dzm3	jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering
dzm3var	jaarlijkse standaardafwijking
bhRWS3cm	toekomstige bodemhoogte in cm tov bodemhoogte 2006 volgens RWS
wdRWS3cm	toekomstige waterdiepte bij OLR in cm tov bodemhoogte 2006 volgens RWS
	<i>Scenario 4,5 %</i>
dzeh45	evenwichtswaarde bodemverandering hoogwaterseizoen
dzel45	evenwichtswaarde bodemverandering laagwaterseizoen
dzm45	jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering
dzm45var	jaarlijkse standaardafwijking
bhRWS45cm	toekomstige bodemhoogte in cm tov bodemhoogte 2006 volgens RWS
wdRWS45cm	toekomstige waterdiepte bij OLR in cm tov bodemhoogte 2006 volgens RWS

Formule Map Calculation in ArcView:

Jaargemiddelde aanzanding/erosie:

$$dzm3 = 0,18 \text{ dzeh3} + 0,82 \text{ dzel3}$$

$$dzm45 = 0,18 \text{ dzeh45} + 0,82 \text{ dzel45}$$

Met een jaarlijkse standaardafwijking van:

$$\text{variatie3} = 0,035 (\text{dzeh3} - \text{dzel3})$$

$$\text{variatie45} = 0,035 (\text{dzeh45} - \text{dzel45})$$

Stap 3. Grids met jaarlijks gemiddelde evenwichtswaarde bodemverandering voor beide scenario's omzetten naar absolute bodemhoogte door op te tellen bij het grid afkomstig van RWS met de absolute bodemhoogte t.o.v. NAP van 2006 (grid genaamd *jmp2006rijn* met een cel grootte van 1x1 meter met de bodemhoogte waarde in centimeters).

Stap 4. De instroomopening van de groene rivier wordt ongeveer verondersteld op het punt  $x=199000$ ,  $y=433500$ , ongeveer rivierkilometer 869,4. Voor OLR is een grid gemaakt op basis van de tabel met waterstanden van RWS.

**Tabel RWS:**

Rivierkilometer	OLR tov NAP in cm
868	731
869	729
870	727
871	725

Waterdiepte grids berekenen door de nieuwe bodemligging af te trekken van de waarde in het OLR grid.

Stap 5. Resulterende grids elk weergeven in een kaart met een topografische achtergrond, rivierkilometer en vaargeul en een kleuren legenda waarbij de waterdiepte kleiner dan 2,80 m bij OLR wordt aangegeven met een kleurenschaal met klasse grootte van 20 cm. De kaarten exporteren naar een digitaal formaat (jpeg).

### 3. Methode

ArcView en spatial analyst zijn gebruikt voor het linken van tabellen aan vlakken bestanden en het omzetten van vlakbestanden (WAQUA rooster) naar grids. Map calculator wordt zijn voor het berekenen van grids. De kaarten zijn in ArcMap gemaakt.

