

4. Schatten van afvoer en snelheden in de nevengeul

4.1 Hydraulische variabelen

De dichtstbijzijnde MSW stations bij de Afferdensche en Deestsche Waarden zijn Nij'megen (km 884), Dodewaard tot 1985 (km 901) en Tiel (km 913). Om de statistiek van de lokale waterstanden in het project gebied (km 899-903) te bepalen moet daarom tussen de gemeten waarden (DONAR) geïnterpoleerd worden. Deze interpolatie is voor de periode 1980-1985 geconstrueerd met behulp van dagwaarden uit de reeksen bij Dodewaard en Tiel, en is daarna uitgebreid om de waterstandsstatistiek voor de periode 1980-2001 te bepalen. In Fig. 4.1 zijn deze geïnterpoleerde waarden weergegeven. Om voor elke Waalafvoer de bijbehorende waterstanden op km 899 en 903 te kunnen bepalen is vervolgens een optimale fit gemaakt van de geïnterpoleerde waarden uit Fig. 4.1. Met deze optimale fit zijn de waterstanden van Tabel 4.1 bepaald.

Tabel 4.1

Geïnterpoleerde waterstand s-gegevens (periode 1980-2001).

jaarlijkse onderschrijding s kans	Waalafvoer [m ³ /s]	Waterstand bij km 899 [m] + NAP	waterstand bij km 903 [m] + NAP	verval over projectgebied [m]
0	584	3.75	3.28	0.47
5	857	4.62	4.15	0.48
10	966	4.85	4.37	0.48
16	1069	5.27	4.79	0.48
20	1120	5.22	4.74	0.48
30	1215	5.32	4.83	0.48
40	1303	5.66	5.18	0.49
50	1412	6.00	5.51	0.49
60	1578	6.20	5.70	0.49
70	1786	6.99	6.49	0.49
80	2090	7.68	7.18	0.50
84	2260	7.85	7.36	0.50
90	2635	8.68	8.18	0.50
100	7309	11.86	11.55	0.31
gemiddelde	1662	6.68	6.19	0.49

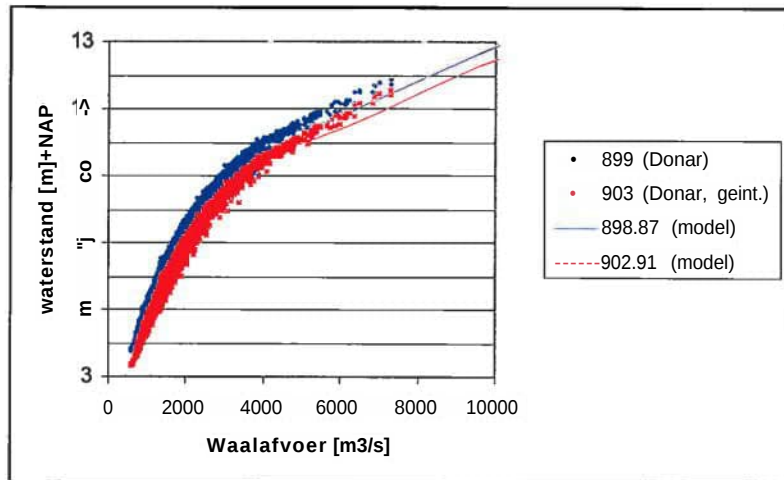
Uit Tabel 4.1 blijkt dat de standaard afwijking van waterstanden in het projectgebied in de grootte orde is van $(7,85-5,27)/2=1,29$ m, en de gemiddelde waterstand ligt tussen 6,19 en 6,68 m + NAP

Om een indruk te krijgen van de interpolatie zijn in Fig. 4.1 de geïnterpoleerde waterstandsgegevens vergeleken met berekende waterstanden uit een Rijntakkenmodel. Trends en de grootte-orde van het verval komen redelijk overeen. Met name voor Waalafvoeren groter

dan 4000 m³/s, als grofweg de Afferdensche en Deestsche uiterwaarden gaan meestromen, zijn de geïnterpoleerde waarden hoger dan de berekende waarden.

Figuur 4.1

Vergelijking geïnterpoleerde en berekende waterstanden.



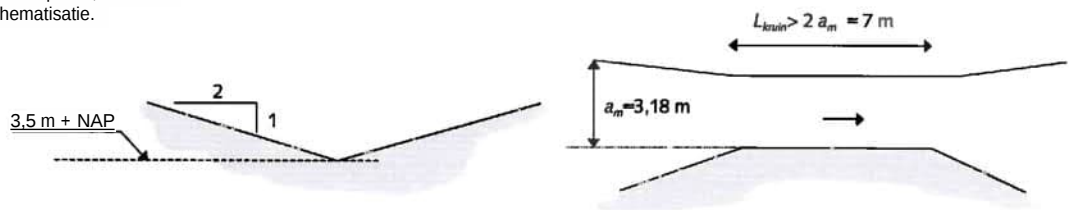
4.2 Schematisering regelwerk

In de nevengeul is een regelwerk aanwezig in de vorm van een drempel met een V-vormig profiel. Een schets hiervan, zoals is gebruikt in de schematisatie, is gegeven in Fig. 4.2. Voor het schematiseren van dit regelwerk zijn een aantal relevante kenmerken verondersteld;

- het minimumniveau ligt op 3,5 m + NAP
- de kruin ligt onder een helling van 1:2
- de lengte van de kruin is meer dan tweemaal de gemiddelde waterdiepte op de kruin (lange overlaat)
- de invloed van de helling van aan- en afstroomtaluds wordt niet beschouwd
- de invloed van 2DH aspecten in aan- en afstroming wordt niet beschouwd.

Figuur 4.2

Schets van regelwerk profiel, zoals is gebruikt in de schematisatie.



In SOBEK is voor het schematiseren regelwerken een rechthoekig profiel beschikbaar, terwijl het regelwerk in het plan een V-vormig profiel kent. De optie van meerdere, parallelle regelwerken met

variërende kruinhoogte wordt hier niet gebruikt; in plaats daarvan wordt met een equivalente breedte dit driehoekig profiel vertaald in een rechthoekig profiel.

Voor de schematisering van de afvoer over een *rechthoekig* profiel geldt

$$Q = C_{Dr} \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} \sqrt{g} B_r H_1^{3/2} \sqrt{1 - \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^2} \quad (4.1)$$

met de empirische reductiefactor zoals gesuggereerd in WL(1998), en met:

B_r	[m]	breedte
C_{Dr}	[-]	afvoercoëfficiënt van het rechthoekig profiel
g	[m/s ²]	gravitatie constante
H_1	[m]	bovenstroomse energiehogte t.o.v. de kruinhoogte
H_2	[m]	benedenstroomse energiehogte t.o.v. de kruinhoogte
Q	[m ³ /s]	afvoer

Voor de afvoer over een *V-vormig* profiel met helling 1:m geldt echter

$$Q = C_{DV} \frac{16}{25} \left(\frac{2}{5} \right)^{1/2} m \sqrt{g} H_1^{5/2} \sqrt{1 - \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{12,5}} \quad (4.2)$$

met: C_{DV} [-] afvoercoëfficiënt van het V-vormig profiel
 m [-] helling van de kruin (1 verticaal; m horizontaal)

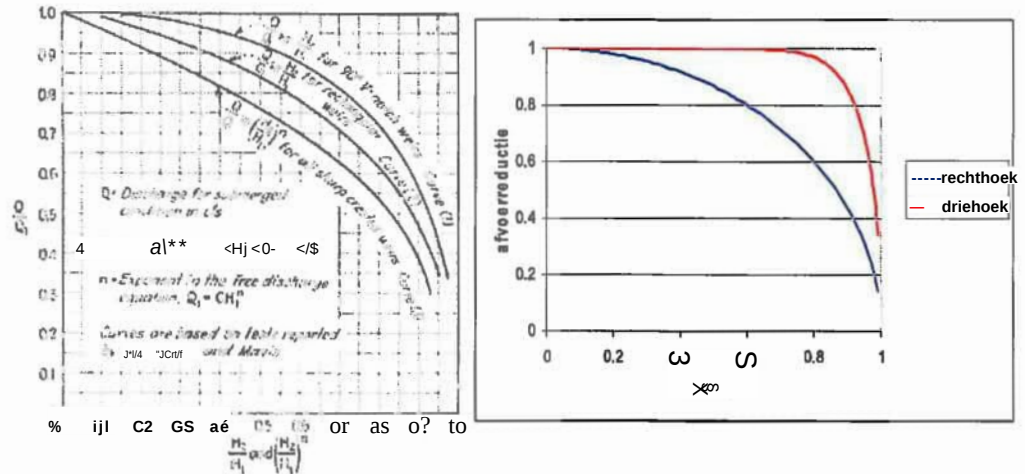
De reductiefactor in Verg. 4.2 (dus ook de macht van 12,5) is (kwalitatief) gebaseerd op een fit van Fig. 4.11 uit Bos (1976). Uit vergelijking van Verg. 4-2 (Bos, 1976) voor C_{Dr} en Fig. 4.10 (Bos, 1976) voor C_{DV} blijkt dat grofweg geldt $C_{Dr} = C_{DV}$. Volgens de empirische formuleringen van Verg. 4.1 en 4.2 is bij onvolkomen stroming over een rechthoekig profiel de afvoerreductie groter dan bij verdrongen stroming over een driehoekig profiel. Dit effect is *kwalitatief* weergegeven in Fig. 4.3-a en 4.3-b.

Figuur 4.3-a (links)

Empirische reductiefactor van afvoer over een driehoekig en rechthoekig profiel (Brateren King, 1976).

Figuur 4.3-b (rechts)

Empirische reductiefactor volgens Verg. 4.1 en 4.2.



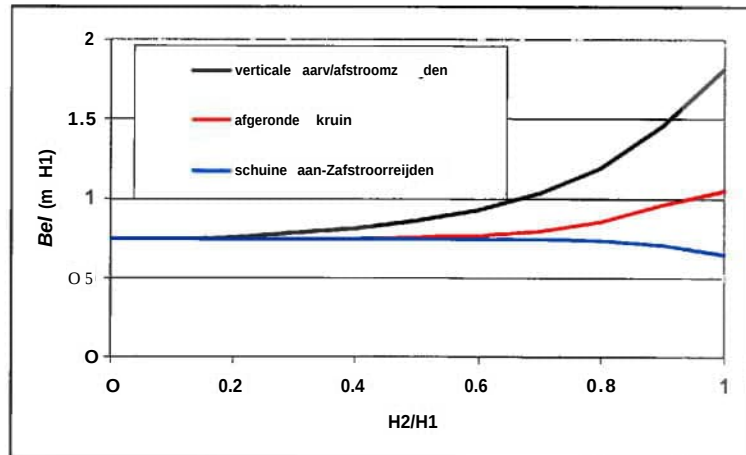
Met de vereenvoudiging $C_{D_r} = C_{D_V}$ kan door combinatie van Verg. 4.1 en 4.2 worden gevonden

$$B_e = 0,74/nH_1 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{12,5}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2}} \quad (4.3)$$

Deze equivalente breedte van het V-vormige regelwerk varieert lineair met de bovenstroomse energiehogte en neemt sterk toe voor onvolkomen stroming (Fig. 4.4). De equivalente breedte varieert dus met de nevengeulafvoer en de mate van volkomenheid. Met H_2/H_1 in de orde van 0,9 wordt gevonden $B_e \sim 1,8/77$, wat met $m=2$ en $H_1=3,18$ m leidt tot $B_1=11,5$ m.

Figuur 4.4

Equivalente breedte van een V-vormig regelwerk.



De gemiddelde breedte van het driehoekig profiel kan bij volkomen stroming worden geschreven als $B = 0.75 H_1$, zodat in dat geval de equivalente breedte van Verg. 4.3 met $C_{D1} = C_{D2}$ kan worden geschreven als $B_e = 0.935 \cdot B$.

Voor onvolkomen stroming nadert Verg. 4.3 tot

$$\frac{B}{H_1} = 0.75 \cdot \frac{1.125}{1} = 1.85. \text{ Ofwel, de equivalente breedte is circa } 1.85 \text{ maal de gemiddelde breedte.}$$

Nb, de invloed van de taluds van aan- en afstroomzijde van het regelwerk beïnvloeden de equivalente breedte van het regelwerk. In Fig. 4.4 is op basis van WL(1998) indicatief weergegeven wat het effect van een afgeronde kruin en aan- en afstroomzijde van het regelwerk onder een talud van 1:2 op de equivalente breedte van het regelwerk is. Voor deze studie is de zwarte lijn gebruikt (verticale zijden).

Met Verg. 4.3 is voor elke hydraulisch relevante conditie de effectieve regelwerk breedte geschat. De numerieke waarden zijn weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2

Effectieve breedte van het regelwerk.

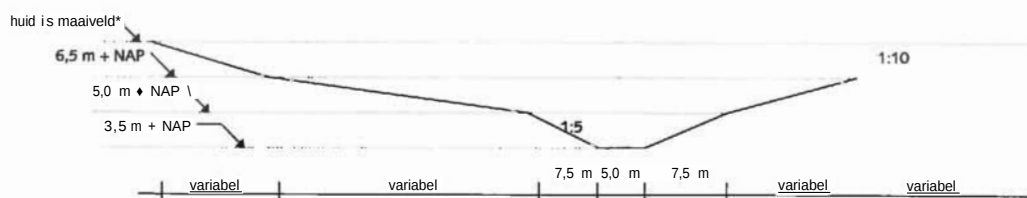
jaarlijkse overschrijdings kans	Waalafvoer [m ³ /s]	waterstand bij km 899 [m] + NAP	waterstand bij km 903 (m) + NAP	H, (geschat) [m]	h ₂ (geschat) [m]	effectieve breedte [m]
0	504	3.75	3.28	0,25	0.02	0
5	857	4.62	4.15	1.12	0.89	3
10	966	4.85	4.37	1.35	1.11	3
16	1069	5.27	4.79	1.77	1.53	5
20	1120	5.22	4.74	1.72	1.48	5
30	1215	5.32	4.83	1.82	1.58	5
40	1303	5.66	5.18	2.16	1.92	6
50	1412	6.00	5.51	2.50	2.25	7
60	1578	6.20	5.70	2.70	2.45	8
70	1786	6.99	6.49	3.49	3.24	11
80	2090	7.68	7.18	4.18	3,93	13
84	2260	7.85	7.36	4.35	4.10	14
90	2635	8.68	8.18	5.18	4.93	17
100	7309	11.86	11.55	8.36	8.20	29
gemiddelde	1662	6.68	6.19	3.18	2.93	10

4.3 Schematisering nevengeul

Op basis van een 1:5000 kaart met (voorlopige!) hoogtelijnen van het plan is langs het geultracé op afstanden van 250 m een dwarsprofiel van de nevengeul geconstrueerd. Deze kaart is getekend (11-02-2003) en beschikbaar gesteld door DON-ANSR. Een karakteristiek geulprofiel in de nog aan te leggen delen is weergegeven in Fig. 4.5.

Figuur 4.5

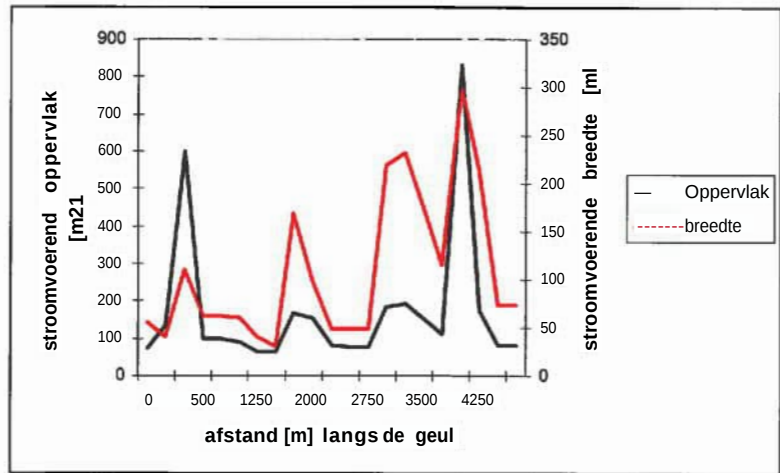
Karakteristiek dwarsprofiel.



Het oppervlak en de gemiddelde stroom voerende breedte van de geschematiseerde dwarsprofielen bij gemiddelde waterstand is weergegeven in Fig. 4.6.

Figuur 4.6

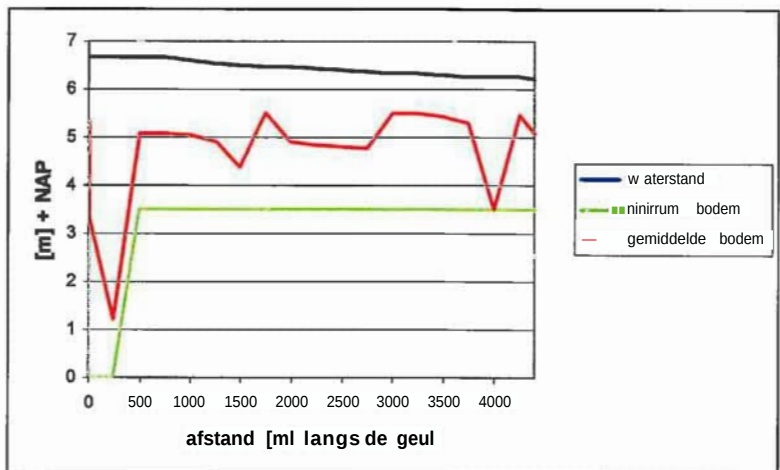
Verloop oppervlak en breedte van geschematiseerd stroomvoerend dwarsprofiel.



Het verloop van de minimale en gemiddelde bodemligging van de geschematiseerde dwarsprofielen is weergegeven in Fig. 4.7. Er is in het model geen bodemverhang aangebracht; in het plan is het bodemverval langs de thalweg (de lijn die de diepste punten van een rivier, bij laag water, met elkaar verbindt) circa 0,35 m.

Figuur 4.7

Verloop minimale en gemiddelde bodemligging van geschematiseerd dwarsprofiel.



De ruwheid van de geul is gemodelleerd met een *Nikuradse* ruwheidswaarde van 0,25 m. Ten behoeve van morfologische berekeningen is in de nevengeul een korreldiameter van 0,4 mm gebruikt, in combinatie met een transportformule volgens Meyer-Peter en Müller (1948). Deze sediment transportformule is uitsluitend van toepassing voor niet-cohesief sediment; erosie, transport en aanslibbing van slib (cohesief) wordt in dit hoofdstuk dus niet beschouwd. Daarvoor kan worden verwezen naar hoofdstuk 5.

4.4 Resultaten direct na aanleg.

Met de initiële dwarsprofielen (dus zonder morfologische veranderingen), kan voor verschillende Waalafvoeren de bijbehorende nevengeulafvoer berekend worden. Deze berekende waarden zijn weergegeven in Tabel 4.3. De waarden van de nevengeulafvoer kunnen worden gebruikt om het aanbod van sediment en slib aan de nevengeul te schatten.

Tabel 4.3

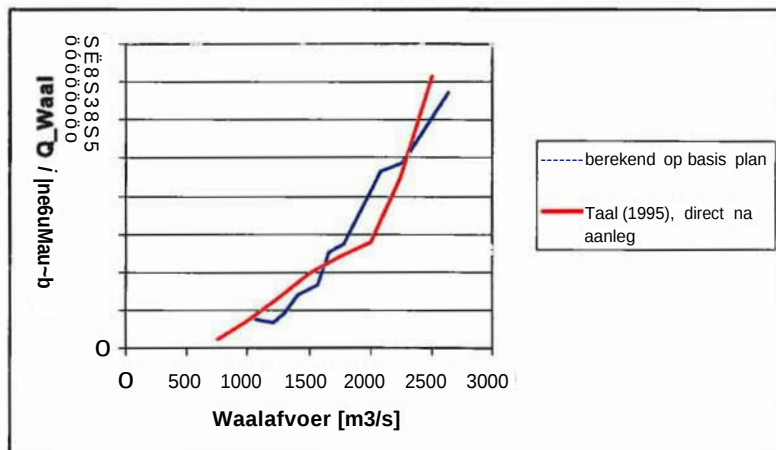
Gegevens tb.v. SOBEK.

jaarlijkse overschrijdingskans	Waalafvoer [m ³ /s]	Effectieve regelwerkbreedte [m]	nevengeulafvoer [m ³ /s]
0	584	0	
5	857	3	
10	966	3	
16	1069	5	7.66
20	1120	5	
30	1215	5	8.08
40	1303	6	11.8
50	1412	7	19.5
60	1578	8	25.6
70	1786	11	48.3
80	2090	13	97.0
84	2260	14	109.4
90	2635	17	177.1
100	7309	29	
Gemiddelde	1662	10	41.4

Voor het schatten van de grootte van de bodemverandering in de Waal is de relatieve grootte van de nevengeulafvoer van belang. Deze waarde is weergegeven in Fig. 4.8, samen met de waarden uit het basisontwerp van de nevengeul (Taai, 1995).

Figuur 4.8

Berekende relatieve nevengeulafvoer.



De overeenkomst tussen beide modellen is redelijk, de gemiddelde hydraulische condities van de geul volgens het huidige plan lijken

voldoende op het oorspronkelijk ontwerp. De afwijkingen in de vorm van de onttrekkingskromme zijn te wijten aan veranderingen in dwarsprofiel.

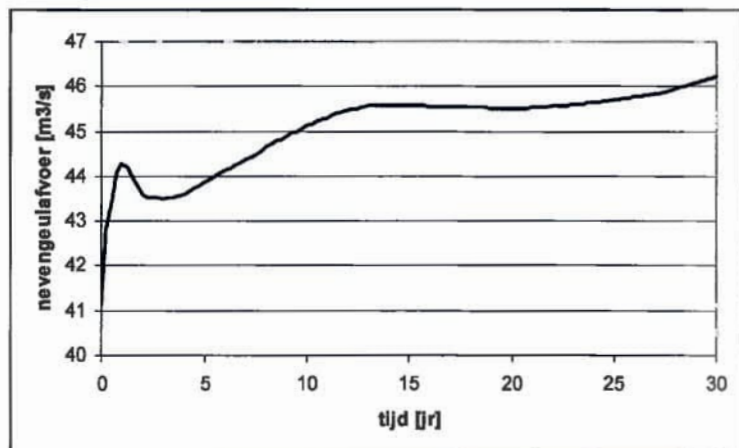
4.5 Resultaten op langere termijn

De nevengeul is zo ontworpen dat al het aangeboden sediment bij de zandvang wordt afgevangen. Benedenstrooms van deze zandvang worden snelheden geacht zo laag te zijn dat geen transport van bodemmateriaal plaatsvindt. Echter, tijdens het aanpassingsproces direct na aanleg en tijdens een hoogwater vinden waarschijnlijk bodemveranderingen in de nevengeul plaats. Hier wordt aandacht besteed aan het aanpassingsproces direct na aanleg. Bodemveranderingen tijdens hoogwater kunnen worden ingeschat met relevante WAQUA berekeningen van het stroombeeld (zie paragraaf 5.3.5).

Het aanpassingsproces na aanleg kan als volgt gekarakteriseerd worden. Veronderstel een constante Waalafvoer met een constant waterstandsverval over de nevengeul (geen hoogwatereffecten). Benedenstrooms van de zandvang vindt in de geul ter plekke van smallere profielen met lokaal hogere stroomsnelheden erosie en transport van bodemmateriaal plaats. Echter, door verruiming van de smallere profielen neemt de weerstand van de geul af, waardoor de nevengeulafvoer kan groeien. Door deze groei in nevengeulafvoer nemen vervolgens de snelheden weer toe, waardoor ter plekke van de smallere profielen opnieuw erosie plaatsvindt, etc. Ter illustratie is in Fig. 4.9 het berekende verloop in de nevengeulafvoer (bij gemiddelde Waalafvoer) weergegeven in een periode van 30 jr. In Fig. 4.9 is de berekende gemiddelde toename in nevengeulafvoer 1 % per 3 jaar.

Figuur 4.9

Het berekende verloop in de nevengeul afvoer op lange termijn.

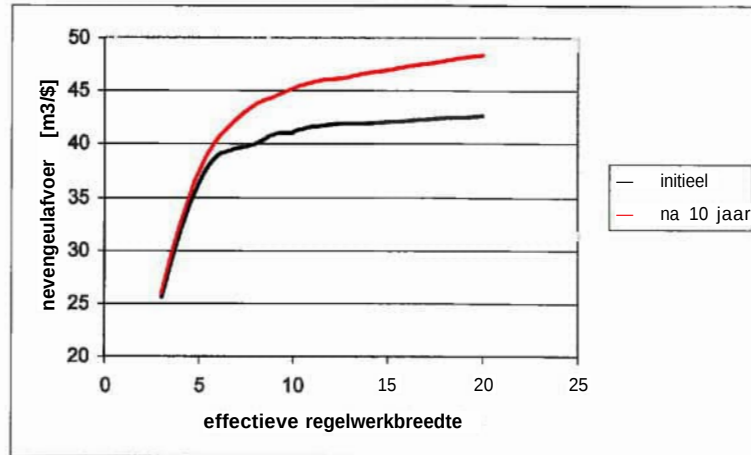


De snelheid van dit proces is afhankelijk van de grootte van het sediment transport: hoe lager de stroomsnelheden (of hoe groter de korreldiameter) des te langzamer deze toename in nevengeulafvoer.

Dit principe is ook weergegeven in Fig. 4.10, waarin voor verschillende nevengeulafvoeren de initiële waarde en de afvoer na 10 jaar is weergegeven. Voor grotere nevengeulafvoeren (hogere snelheden) geldt een grotere toename. Als de snelheid in de nevengeul zodanig is gedaald dat de bijbehorende bodemschuifspanningen kleiner zijn dan de kritische waarde voor transport van bodemmateriaal, dan stopt het proces en bereikt de geul een evenwichtssituatie.

Figuur 4.10

Groei in nevengeulafvoer bij verschillende regelwerkbreedten.



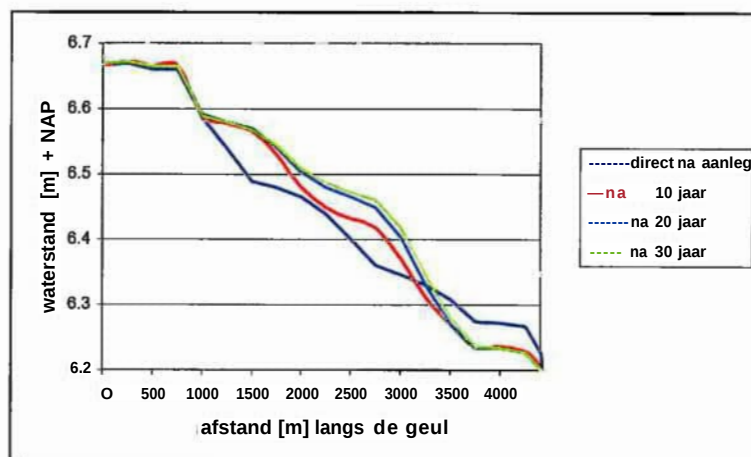
Aanbevolen wordt om het huidige ontwerp als uitgangspunt te houden, en de nevengeulafvoer bij gemiddelde Waalafvoer jaarlijks te monitoren. Voor het voorspellen van morfologische veranderingen in het zomerbed van de Waal zal rekening gehouden worden met een 5% toename in nevengeulafvoer in de eerste 10 jaar na aanleg.

4.6 Abiotische kenmerken bij gemiddelde Waalafvoer

Op basis van de morfologische berekeningen zijn de volgende parameters te presenteren.

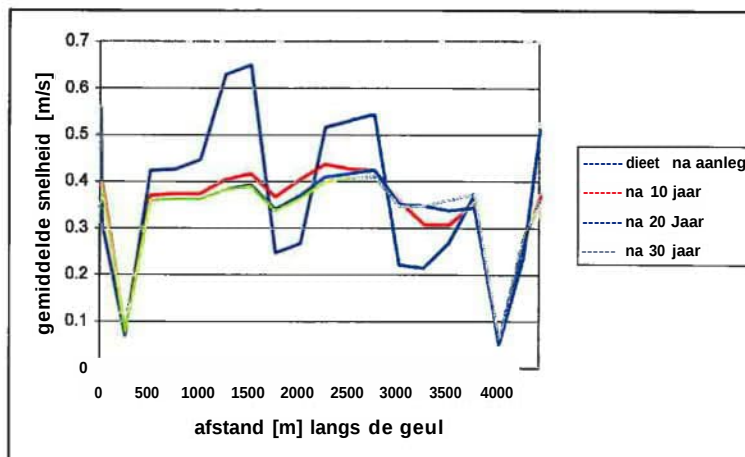
Figuur 4.11

Berekende waterstanden in de nevengeul.



Figuur 4.12

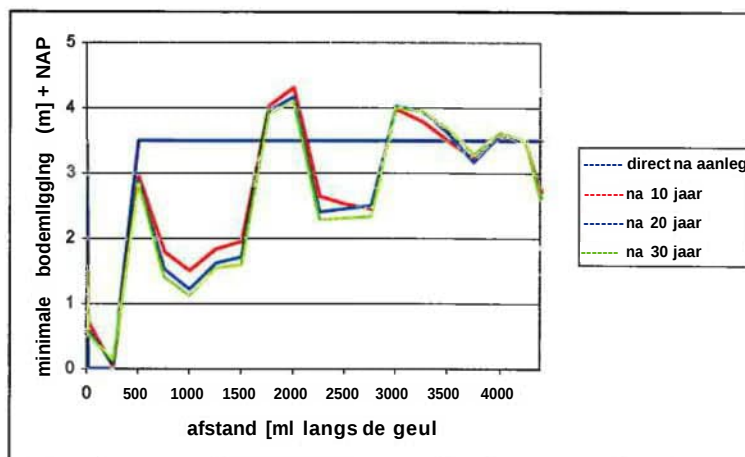
Berekende stroomsnelheden in de nevengeul.



De relatief hoge stroomsnelheden direct na aanleg zijn een gevolg van de redelijk grove schematisatie van het dwarsprofiel. In Fig. 5.10 in hoofdstuk 5 wordt een beeld van overwegend lagere stroomsnelheden gegeven wat beter in overeenstemming is met het plan.

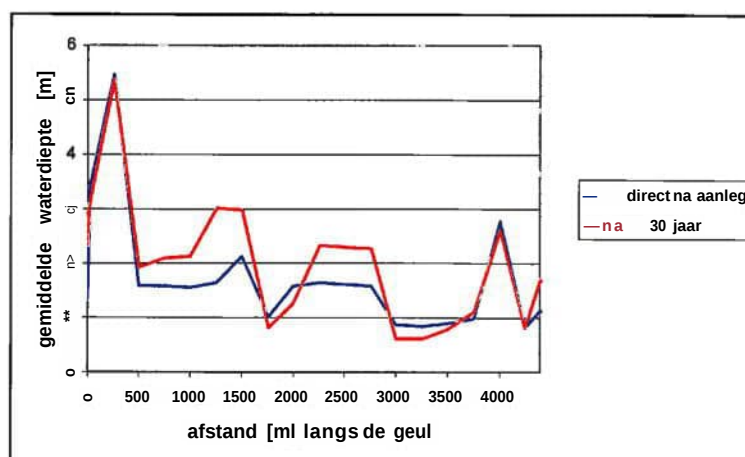
Figuur 4.13

Berekende bodemligging in de nevengeul.



Figuur 4.14

Gemiddelde waterdiepte in de nevengeul.



5. Sedimentatie en erosie in de nevengeul van de Afferdensche en Deestsche waarden

5.1 Inleiding

Bij de risico schatting voor de verspreiding naar oppervlaktewater bij het project Afferdensche en Deestsche waarden is een van de aspecten risico voor erosie van de mogelijk verontreinigde bodem van de nevengeul.

Als gevolg van grote stroomsnelheden kan er in de nevengeul erosie optreden. Het is dus van belang om na te gaan of er netto erosie van bodemmateriaal kan optreden en zeker als er sprake is van nog resterende verontreinigde lagen in de bodem van de nevengeul.

Tevens is het van belang om te weten hoe snel de nevengeul eventueel dicht sedimenteert en er dus onderhoud aan de nevengeul gepleegd moet gaan worden.

De direct na aanleg in de nevengeul te verwachte sedimentatie van zwevend stof en erosie van bodemmateriaal is berekend met behulp van het SOBEK-slibmodel van de nevengeul. De basis van het slibmodel wordt gevormd door het SOBEK-model, zoals dat beschreven is in hoofdstuk 4, en wat de waterbeweging van de nevengeul beschrijft. Dit model is uitgebreid door het geschikt te maken voor waterkwaliteitsberekeningen waarmee onder andere sedimentatie en erosie van zwevend stof kan worden berekend.

Het transport van zwevend stof wordt binnen SOBEK-waterkwaliteit berekend door het oplossen van de advection-diffusie vergelijkingen, hierin wordt de verandering van de concentratie (zwevend stof) in de tijd berekend aan de hand van het advectieve en dispersieve transport:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) = M \quad (5.1)$$

Waarin:

C	[kg/m ³]	concentratie van de stof
t	[s]	tijd
v _x	[m/s]	stroomsnelheid x-richting
D _x	[m ² /s]	dispersiecoëfficiënt in de x-richting
M	[-]	bron- of puttermen

Met bron- en puttermen wordt hier de uitwisseling met de bodem bedoeld: erosie en sedimentatie.

Binnen SOBEK-waterkwaliteit kan de slibbeweging beschreven worden met maximaal 3 fracties. Hiervoor is fijn zand, grof slib en fijn slib als uitgangspunt genomen.

De berekening van sedimentatie in de waterkwaliteitsmodule is gebaseerd op de formulering van Krone (Krone, 1962). Het al dan niet optreden van sedimentatie wordt in deze vergelijking afhankelijk verondersteld van de lokale stroomsnelheid. Hiernaast is de kritische snelheid voor sedimentatie van belang, boven deze snelheid zal een deeltje niet meer kunnen sedimenteren, daaronder wel. De sedimentatie is maximaal in stilstaand water en de zwevend stofdeeltjes vallen dan met hun karakteristieke valsnelheid naar de bodem.

Voor elk van de drie fracties geldt een andere kritische snelheid voor sedimentatie en een andere valsnelheid.

Binnen SOBEK-waterkwaliteit wordt bij de berekening van sedimentatie en erosie niet gerekend met snelheden, maar met schuifspanningen. De omrekening van snelheid naar schuifspanning gaat via de formule:

$$\tau = \rho \times g \times \frac{v^2}{C} \quad (5.2)$$

Waarin:

P	(kg/m ³)	dichtheid waterfase
g	(m/s ²)	zwaartekrachtsversnelling
C	(m ⁴ /s)	Chézyruwheidsfactor
v	(m/s)	(profielgemiddelde) stroomsnelheid

In de gebruikte modelformulering wordt voor elke fractie i de sedimentatie bepaald volgens:

$$F_{s,i} = \begin{cases} 0 & \tau_b \leq \tau_{s,kr(i)} \\ W_{s,i} C_i \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{s,kr(i)}} \right) & \tau_b > \tau_{s,kr(i)} \end{cases} \quad (5.3)$$

Waarin:

$F_{s,i}$	[kg/m ² .s]	sedimentatieflux fractie i
τ_b	[N/m ²]	schuifspanning aan de bodem
$\tau_{s,kr(i)}$	[N/m ²]	kritische schuifspanning voor sedimentatie fractie i
C_i	[kg/m ³]	concentratie zwevend stof fractie i
$W_{s,i}$	[m/s]	valsnelheid fractie i

Erosie is ook een transportterm tussen de waterfase en de bodem. Deze wordt beschreven volgens Partheniades (Partheniades, 1965). In deze formulering is erosie afhankelijk van de lokale schuifspanning. Bij overschrijding van de kritische schuifspanning treedt erosie op. Hierbij wordt gebruik gemaakt van één fractie, bij het optreden van erosie breekt de bodem immers niet per fractie op, maar gaat de bodem als 'brokken' weg. In het model wordt daarom verondersteld dat de drie

zwevend stoffracties in de bodem homogeen gemengd zijn. Als er materiaal erodeert dan is de verdeling over de fracties gelijk aan de verdeling in de toplaag. Bij het proces erosie spelen twee parameters een rol: de erosiesnelheidsconstante en de kritische snelheid voor erosie. De eerste geeft de snelheid van de optredende erosie aan en de tweede geeft het moment van erosie aan, oftewel de stroomsnelheid van het water (in een 1 D-model is dit de profielgemiddelde snelheid) waarbij erosie optreedt. In het model wordt de erosieflux berekend volgens:

$$F_e = 0 \quad \tau \leq \tau_{e,kr} \quad (5.4)$$

$$F_e = M_e \left[\left(\frac{\tau_b}{\tau_{e,kr}} \right) - 1 \right] \quad \tau > \tau_{e,kr}$$

Waarin:

F_e	[kg/m ² .s]	erosieflux
$\tau_{e,kr}$	[N/m ²]	kritische schuifspanning voor erosie
M_e	[kg/m ² .s]	erosiesnelheidsparameter

Voordat berekeningen met de kwaliteitsmodule kunnen worden uitgevoerd, moeten een aantal gegevens in het model opgegeven worden, waaronder randvoorwaarden, initiële condities en segmentgrenzen waarbinnen de concentratie zwevend stof homogeen verondersteld mag worden.

Bij de SOBEK-berekeningen wordt eerst de waterbeweging voor de gehele periode berekend en vervolgens de waterkwaliteit (slibtransport). Door deze volgorde van rekenen wordt de veranderde bodemiigging door eventuele sedimentatie of erosie niet in de waterbewegingberekening aangepast.

5.2 Bouw SOBEK-slibmodel nevengeul ADW

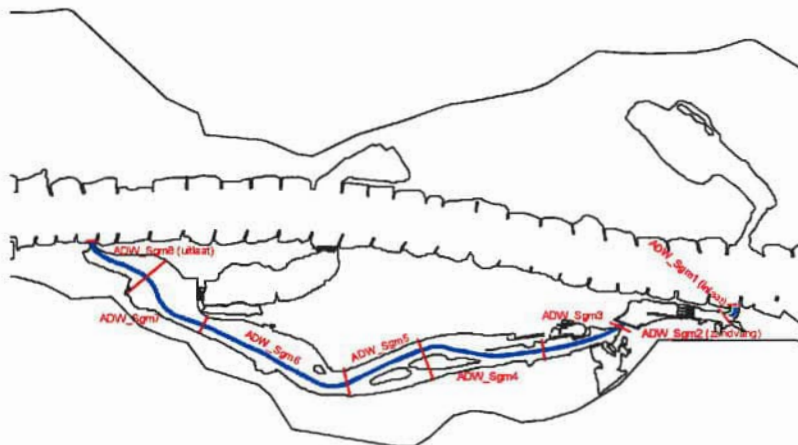
5.2.1. Segmenten

Het slibtransport wordt in de waterkwaliteits module berekend in segmenten, de basis ruimtelijke eenheid voor de numerieke oplossing van de waterkwaliteitsberekening van het model. Een segment is een bepaald watervolume met een bepaalde diepte en een bepaald wateroppervlak en met een homogene waterkwaliteit.

Waar de segmenten liggen in de nevengeul en hoelang zij zijn, is bepaald door in de SOBEK-schematisatie de achter elkaar liggende profielen die ongeveer hetzelfde zijn binnen één segment te houden. Zo is de nevengeul verdeeld in 8 segmenten, (figuur 5.1 en tabel 5.1)

Figuur 5.1

Modelsegmenten nevengeul
Afferdensche en Deestsche waarden.



Tabel 5.1

Segmentlengten.

Segment	Lengte in m
ADW_Sgm1 (Inlaat)	100
ADW_Sgm2 (zandvang)	650
ADW_Sgm3	500
ADW_Sgm4	750
ADW_Sgm5	500
ADW_Sgm6	1000
ADW_Sgm7	500
ADW_Sgm8 (uitlaat)	400

5.2.2, Randvoorwaarden

Voor de waterbewegingsberekeningen zijn dezelfde instellingen en randvoorwaarden aangehouden als bij de morfologische berekeningen (zie hoofdstuk 4).

Voor het zwevend stof is in SOBEK aangegeven dat dit berekend moet worden met behulp van drie fracties, IM1, IM2 en IM3, waarbij binnen de berekeningen IM1 verondersteld wordt de fijne slibfractie te zijn, IM2 de grove slibfractie en IM3 de fijne zandfractie.

Als zwevend stofrandvoorwaarden voor het model is het gehalte aan zwevend stof bij Lobith aangehouden. Aangezien het om modelberekeningen gaat met stationaire afvoeren is het zwevend stofgehalte bij Lobith bepaald aan de hand van de relatie zwevend stofvracht en afvoer bij Lobith (Fioole, 2002). De verdeling over de drie fracties (fijn slib, grof slib en fijn zand) is uitgevoerd volgens de methode Ludikhuize en Ruygh (Ludikhuize en Ruygh, 1989). In tabel 5.2 is per afvoer de verdeling van het zwevend stof over de fracties in procenten weergegeven. Tevens is in de tabel weergegeven de gehalten die als randvoorwaarden in het model, voor zowel de boven- als benedenrand, zijn opgegeven.

Tabel 5.2

Verdeling zwevend stofgehaltes over de fracties fijn slib, grof slib en fijn zand bij verschillende afvoeren.

Afvoer Waal	ZS	fijn slib	grof slib	fijn zand
m ³ /s	g/m ³	% (g/m ³)	% (g/m ³)	% (g/m ³)
857	13	44% (5.71)	44% (5.71)	11% (1.44)
966	14	44% (6.29)	44% (6.29)	12% (1.74)
1069	16	44% (6.75)	44% (6.75)	13% (2.02)
1215	17	43% (7.27)	43% (7.27)	14% (2.42)
1303	18	43% (7.54)	43% (7.54)	15% (2.66)
1412	19	42% (7.83)	42% (7.83)	16% (2.96)
1578	20	41% (8.19)	41% (8.19)	17% (3.44)
1786	21	40% (8.56)	40% (8.56)	19% (4.04)
2090	23	39% (8.99)	39% (8.99)	22% (4.98)
2260	25	38% (9.53)	38% (9.53)	23% (5.74)
2635	30	37% (10.98)	37% (10.98)	26% (7.85)
7309	77	17% (15.45)	17% (15.45)	66% (46.36)

5.2.3. Initiële condities

Voor een goede berekening is het van belang dat er aan het begin van de berekening een bodem aanwezig is met een realistische verhouding van de fracties. De opgegeven bodemhoeveelheid is daarbij niet zo van belang, als er maar voldoende bodemmateriaal aanwezig is dat kan gaan eroderen in het geval er erosie op gaat treden. Belangrijker is meer de verhouding van de drie fracties, omdat dit bepaald of de bodem zandig of slibbig of een vorm ertussenin is. En dat is weer van belang op het moment dat er erosie optreedt. De erosie van de bodem gaat weliswaar in brokken en niet in fracties apart, maar de verdeling van het opgewerkte hoeveelheid sediment in de waterfase over de drie fracties is afhankelijk van hoe de verhouding van de drie fracties in de bodem is.

De begintoestand van de bodem is bepaald aan de hand van kaarten van het toekomstig maaiveld (MAW-2003-237-T2: Lutum (<2pm), MAW-2003-232-T2: Silt (2-63nm) en MAW-2003-239-T2: Zand (>63pm)). Binnen SOBEK kan de begintoestand van de bodem alleen per tak of voor het gehele model opgegeven worden, daarom is per fractie het gemiddelde van de gehele nevengeul geschat en als initiële bodem gebruikt (tabel 5.3).

Tabel 5.3

Beginwaarden bodem nevengeul ADW.

Inactive substances in sediment		
fijn slib (IM1)	grof slib (IM2)	fijn zand (IM3)
1,6.10 ⁷ g	2,7.10 ⁷ g	5,7.10 ⁷ g

5.2.4. Procesconstanten

Voor berekeningen van het slibtransport moeten in SOBEK enkele procesconstanten worden opgegeven voor o.a. de parameters sedimentatiesnelheid, kritische schuifspanning voor sedimentatie, kritische schuifspanning voor erosie en de erosiesnelheidsparameter.

In tabel 5.4 staan de gebruikte parameterinstellingen vermeldt, zoals die ook in voorgaande studies (Van Wijngaarden en Ludikhuizen, 1998, Van Wijngaarden, 1998 en Sloot en Van den Berg, 2000) zijn gebruikt.

Tabel 5.4	Procesconstanten	waarde	eenheid	waarde omgerekend	eenheid
				naar schuifspanning	
Procesconstanten voor de berekening van het slibtransport in SOBEK.	Sedimentatiesnelheid				
	- fijn slib	0,25	m/d		
	■ grof slib	10	m/d		
	- fijn zand	25	m/d		
	kritische snelheid voor sedimentatie				
	- fijn slib	0,25	m/s	0,55	N/m ³
	- grof slib	0,50	m/s	2,21	N/m ³
	- fijn zand	0,75	m/s	4,97	N/m ³
	Erosiesnelheidsconstante	500	g/m ² .d		
	kritische snelheid voor erosie	0,5	m/s	2,21	N/m ²

Voor de fractie fijn zand kan het voorkomen dat de berekende schuifspanning kleiner of gelijk is aan de kritische schuifspanning voor sedimentatie en tegelijkertijd groter of gelijk is aan de kritische schuifspanning voor erosie. Er wordt dan door SOBEK zowel sedimentatie als erosie van de fractie berekend. Het nettoresultaat uiteindelijk is het verschil tussen sedimentatie en erosie. Is dit positief dan overheerst de sedimentatie, is dit negatief dan overheerst de erosie. Hetzelfde geldt voor de grof slibfractie indien de stroomsnelheid gelijk is aan zowel de kritische snelheid voor sedimentatie als erosie. Binnen SOBEK kan niet meer dan één kritische schuifspanning voor erosie worden opgegeven. In het verleden is hier enig onderzoek naar gedaan in een uiterwaard en uiteindelijk gekozen voor 0,5 m/s als gemiddelde (Van Wijngaarden, 1998).

5.3 Sedimentatie en erosie

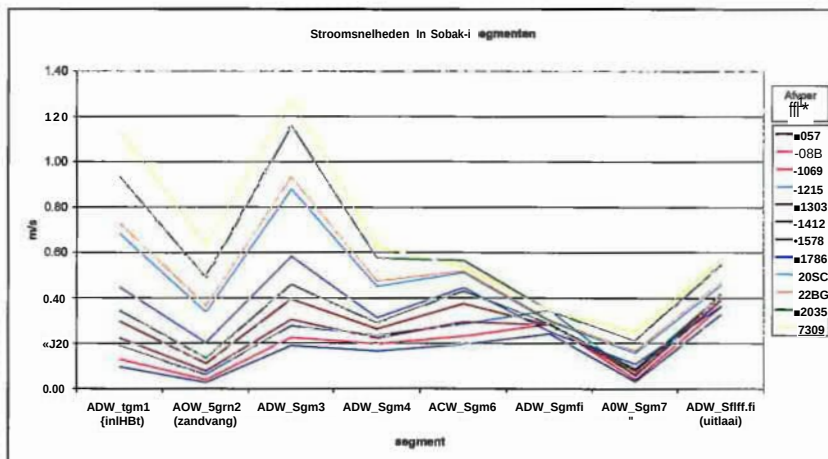
Er zijn voor 8 Waalafvoeren stationaire modelberekeningen uitgevoerd. De afvoeren zijn dezelfde afvoeren zoals vermeld in hoofdstuk 4, namelijk: 857, 966, 1069, 1215, 1303, 1412, 1578, 1786, 2090, 2260, 2635 en 7309 m³/s.

5.3.1. Stroomsnelheden in segmenten van de nevengeul

De sedimentatie en erosie in de nevengeul wordt in SOBEK berekend aan de hand van de bodemschuifspanning. De in de segmenten bij verschillende afvoeren berekende bodemschuifspanningen zijn omgerekend naar stroomsnelheden en weergegeven in figuur 5.2 en tabel 5.5.

Figuur 5.2

Stroomsnelheden in segmenten van de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.



Tabel 5.5

Stroomsnelheid per segment bij verschillende afvoeren.

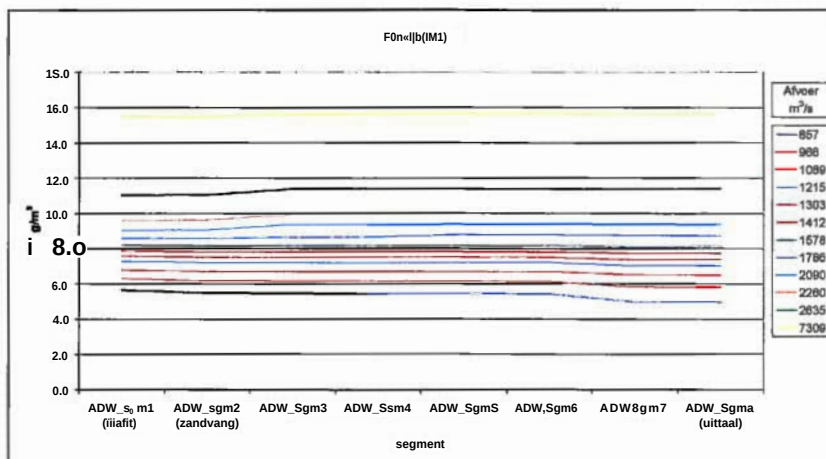
Stroomsnelheid (m/s)									
jaarlijkse onderschrij- dingskans	Q _{waal} (m³/s)	ADW_sgm1 (inlaat)	ADW_sgm2 (zandvang)	ADW.Sgm 3	ADW_Sgm 4	ADW_Sgm 5	ADW_Sgm 6	ADW_Sgm 7	ADW.Sgm 8 (uitlaat)
5	857	0.10	0.03	0.19	0.17	0.20	0.24	0.03	0.33
10	966	0.13	0.04	0.22	0.20	0.23	0.28	0.04	0.36
16	1069	0.19	0.06	0.28	0.23	0.29	0.34	0.05	0.41
30	1215	0.19	0.06	0.28	0.23	0.28	0.35	0.05	0.41
40	1303	0.22	0.08	0.30	0.22	0.29	0.28	0.06	0.39
50	1412	0.30	0.11	0.39	0.26	0.37	0.28	0.08	0.40
60	1578	0.34	0.13	0.46	0.29	0.43	0.29	0.09	0.41
70	1786	0.45	0.20	0.58	0.31	0.45	0.25	0.11	0.37
80	2090	0.68	0.34	0.88	0.45	0.51	0.30	0.16	0.46
84	2260	0.73	0.36	0.93	0.47	0.52	0.30	0.17	0.47
90	2635	0.93	0.49	1.16	0.57	0.57	0.34	0.21	0.55
100	7309	1.14	0.63	1.28	0.63	0.54	0.34	0.25	0.57

5.3.2. Zwevend stofgehalte

Het fijne slibgehalte neemt over de gehele nevengeul gezien als gevolg van sedimentatie zeer langzaam af (figuur 5.3) bij afvoeren tot aan 1578 m³/s. Bij hogere afvoeren neemt het gehalte aan fijn slib iets toe, als gevolg van erosie in segment ADW_Sgm3, het segment net achter het regelwerk. Vervolgens blijft in de verdere loop van de nevengeul het gehalte fijn slib gelijk. Bij hele lage afvoeren (857 en 966 m³/s) neemt het gehalte fijn slib aan het einde van de nevengeul enigszins af.

Figuur 5.3

Het fijne slibgehalte (IM1) in de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.

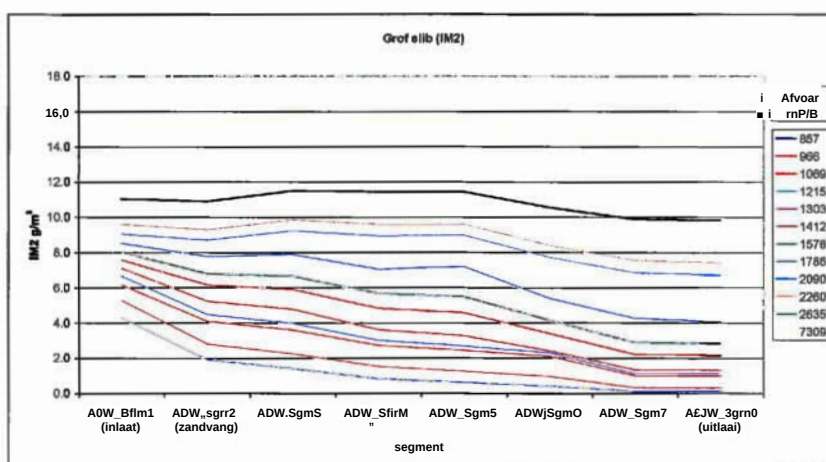


Figuur 5.4 laat zien dat het gehalte grof slib, bij afvoeren tot aan 1786 m³/s, in de loop van de nevengeul steeds verder afneemt, uitgezonderd in segment ADW_Sgm8.

Bij afvoeren hoger dan 2090 m³/s neemt het gehalte grof slib in de eerste twee segmenten, de inlaat en de zandvang, af (sedimentatie), waarna in segment ADW_Sgm3 het gehalte grof slib weer toeneemt (erosie), om in de segmenten ADW_Sgm4 en ADW_Sgm5 gelijk te blijven en vervolgens in de rest van de nevengeul weer af te nemen.

Figuur 5.4

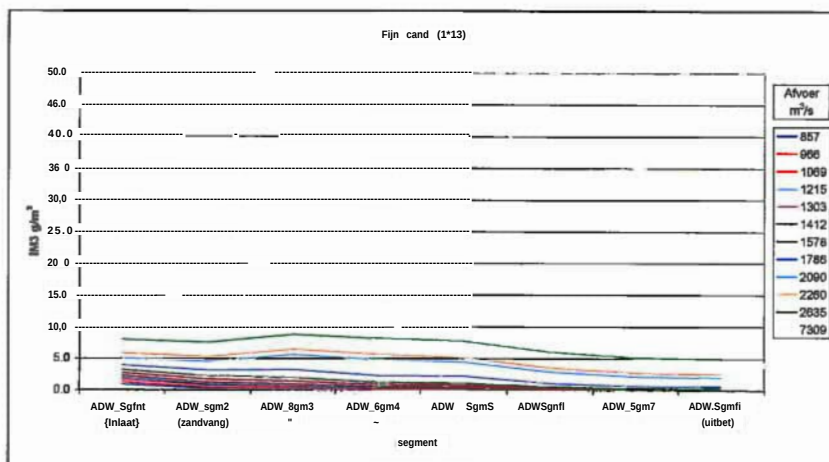
Het grove slibgehalte (IM2) in de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.



Het gehalte fijn zand (figuur 5.5) neemt in de gehele nevengeul bij afvoeren tussen de 857 en 1786 m³/s af door sedimentatie van het fijn zand. Bij een afvoer van 2090 m³/s en hoger is er een afname te zien in het fijne zandgehalte in de zandvang (segment ADW_Sgm2) en vervolgens als gevolg van erosie weer een toename in segment ADW_Sgm3. In de rest van de nevengeul is dan weer een afname in gehalte te zien.

Figuur 5.5

Het fijne zandgehalte (IM3) in de nevengeul bij verschillende Waal afvoeren.



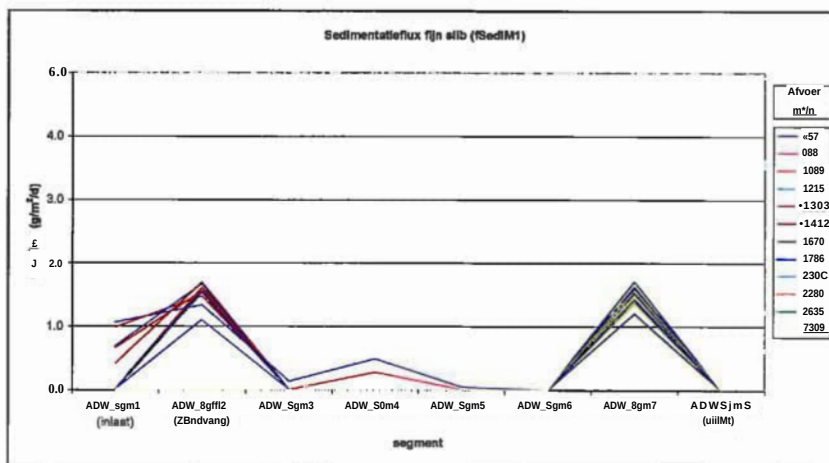
De berekende hoge gehalten fijn zand bij een afvoer van 7309 m³/s is niet zo zeer het gevolg van flinke erosie, maar hoofdzakelijk veroorzaakt door de hoge zwevend stofrandvoorwaarden. Bij maatgevende hoge afvoeren blijft het fijne zand in suspensie.

5.3.3. Sedimentatie

Bij alle afvoeren vindt er een kleine hoeveelheid sedimentatie van fijn slib (figuur 5.6) plaats in het segment ADW_Sgm7. In segment ADW_Sgm2 (de zandvang) is dat het geval bij afvoeren tot aan 1786 m³/s en bij afvoeren beneden de 1303 m³/s ook in segment ADW_Sgm1 (de inlaat). Bij de hele lage afvoeren 857 en 966 m³/s is er nog een hele kleine hoeveelheid sedimentatie te zien in segment ADW_Sgm4. Boven de zojuist vermelde afvoeren komt in de desbetreffende segmenten geen sedimentatie van het fijne slib meer voor. In de segmenten ADW_Sgm3, ADW_Sgm5, ADW_Sgm6 en ADW_Sgm8 vindt bij geen van de doorgekende afvoeren sedimentatie van het fijne slib plaats.

Figuur 5.6

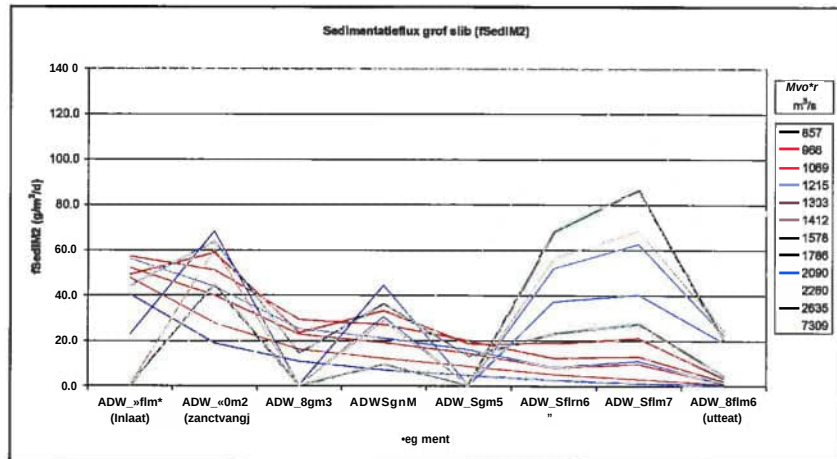
Sedimentatieflux fijn slib in de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.



Bij vrijwel alle afvoeren is er in elk segment van de nevengeul sedimentatie van grof slib (figuur 5.7). De grootste hoeveelheid vindt plaats aan het begin van de nevengeul, waarna in de rest van de nevengeul een afname is te zien. Bij afvoeren hoger dan 1786 m³/s is er echter geen sedimentatie van grof slib in de segmenten ADW_Sgm1 (inlaat), ADW_Sgm3 en ADW_Sgm5, dit als gevolg van te hoge stroomsnelheden. Hier treedt erosie van grof slib op, wat in de daarop volgende segmenten weer sedimenteert.

Figuur 5.7

Sedimentatieflux grof slib in de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.

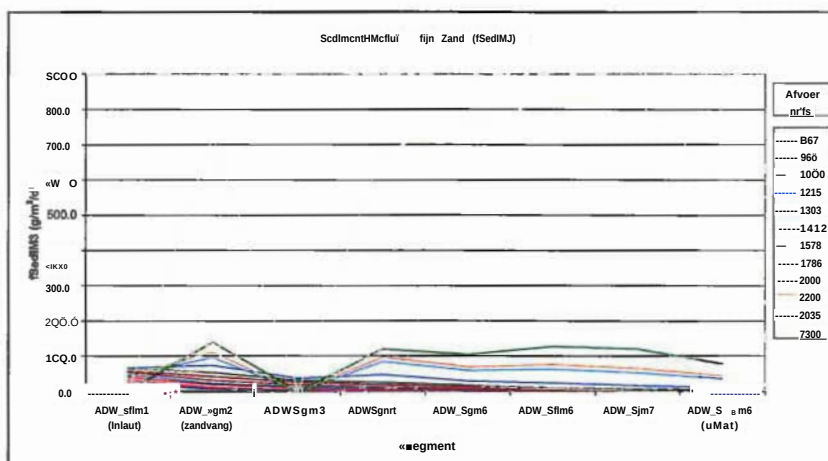


Bij alle afvoeren is er in de nevengeul sedimentatie van fijn zand. Dit is te zien in figuur 5.8. De meeste sedimentatie van het fijne zand vindt plaats aan het begin van de nevengeul in de inlaat, segment ADW_Sgm1, en de zandvang, segment ADW_Sgm2. De sedimentatiehoeveelheid neemt in de loop van de nevengeul steeds verder af. Bij afvoeren lager dan 1303 m³/s is er zelfs nauwelijks tot geen sedimentatie meer van het fijne zand in de laatste twee segmenten aan het einde van de nevengeul.

Bij de hogere afvoeren, 2090, 2260, 2635 en 7309 m³/s, vindt er geen sedimentatie van het fijne zand plaats in het segment ADW_Sgm3 en bij 2635 en 7309 m³/s is dat ook het geval in segment ADW_Sgm1(in laat). Als gevolg van te hoge stroomsnelheden treedt er dan in die segmenten geen sedimentatie maar erosie op. Het geërodeerde fijne zand sedimenteert weer in de verdere loop van de nevengeul.

Figuur 5.8

Sedimentatieflux fijn zand in de nevengeul bij verschillende Waatafvoeren.



In tabel 5.6 is voor elk segment de totaal door SOBEK berekende sedimentatie bij verschillende afvoeren weergegeven.

Tabel 5.6

Totale sedimentatie per segment bij verschillende afvoeren.

Totale Sedimentatieflux (fijn slib + grof slib + fijn zand) (gDW/m ² /d)									
jaarlijkse onderschrijdingskans	Qwaa (m ³ /s)	ADW_sgm1 (inlaat)	ADW_sgm2 (zandvang)	ADW_Sgm3	ADW_Sgm4	ADW_Sgm5	ADW_Sgm6	ADW_Sgm7	ADW_Sgm8 (uitlaat)
5	857	63	25	13	8	9	3	2	0
10	966	79	39	20	14	10	5	4	0
16	1069	91	59	33	24	18	10	12	1
30	1215	103	68	38	27	21	11	13	1
40	1303	110	83	48	37	27	15	16	3
50	1412	106	102	49	51	31	24	26	5
60	1578	108	118	46	62	30	32	35	8
70	1786	88	143	37	91	28	60	57	29
80	2090	43	157	0	114	58	114	116	57
84	2260	39	170	0	124	69	131	134	67
90	2635	0	183	0	129	104	195	208	98
100	7309	0	748	c	709	795	944	950	656

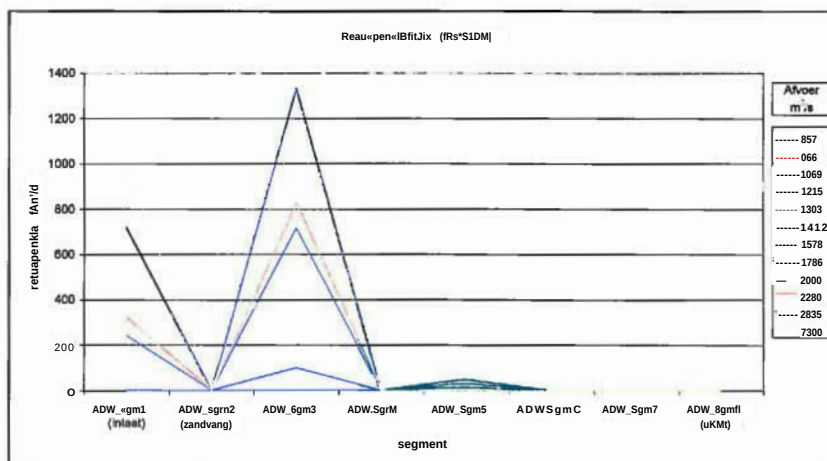
5.3.4. Erosie

In de nevengeul door de Afferdensche en Deestsche waarden wordt door SOBEK geen erosie berekend tijdens afvoeren van 1578 m³/s en lager (figuur 5.9). in het segment net na het regelwerk, ADW_Sgm3, vindt wel erosie plaats tijdens afvoeren van 1786 m³/s en hoger. Dit is ook het geval in segment ADW_Sgm1 (inlaat) bij afvoeren van 2090 m³/s en hoger.

Lichte erosie vindt plaats in segment ADW_Sgm5 bij afvoeren tussen de 1786 en 2635 mVs.

Figuur 5.9

Resuspensieflux in de nevengeul bij verschillende Waalafvoeren.



In tabel 5.7 is voor elk segment de door SOBEK berekende erosie bij verschillende afvoeren weergegeven.

Tabel 5.7

Erosie per segment bij verschillende afvoeren.

Erosieflux (fResSIDM) (gDM/m ³ /d)									
jaarlijkse onderschrij- dingskans	Q _{waal} (m ³ /s)	ADW_sgm1 (inlaat)	ADW_sgm2 (zandvang)	ADW_Sgm 3	ADW_Sgm 4	ADW_Sgm 5	ADW_Sgm 6	ADW_Sgm 7	ADW.Sgm 8 (uitlaat)
5	857	0	0	0	0	0	0	0	0
10	966	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1069	0	0	0	0	0	0	0	0
30	1215	0	0	0	0	0	0	0	0
40	1303	0	0	0	0	0	0	0	0
50	1412	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1578	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1786	0	0	99	0	48	0	0	0
80	2090	239	0	715	0	31	0	0	0
84	2260	319	0	825	0	15	0	0	0
90	2635	716	0	1329	0	14	0	0	0
100	7309	981	0	1168	0	0	0	0	0

Bij deze resultaten moet wel opgemerkt worden dat er ook erosie optreedt bij de hoogste afvoeren, waarbij de nevengeul buiten zijn oevers treedt. Binnen SOBEK wordt dan de maximale breedte van het doorstroomprofiel aangehouden. In werkelijkheid wordt deze breedte groter en dus ook het doorstroomprofiel. Hetgeen weer resulteert in lagere stroomsnelheden dan in de SOBEK-berekeningen, waar de maximale breedte wordt aangehouden (Snippen et al, 2002). Een vergelijk met een WAQUA-berekening met een afvoer van 8000 m³/s bij Lobith (< 5300 m³/s bij Tiel) laat zien dat de stroomsnelheden ter plaatse van de nevengeul lager uitvallen dan die door SOBEK

berekend worden, uitgezonderd ter plaatse van segment ADW_Sgm7 en ADW_Sgm8. Tijdens deze afvoer gaat dit deel van de uiterwaard flink mee stromen (tabel 5.8).

Tabel 5.8

WAQUA- en SOBEK-snelheden (m/s).

Snelheden in m/s	WAQUA Q Waal 5300 m ³ /s (gem.)	SOBEK Q Waal 2635 m ³ /s	SOBEK Q Waal 7309 m ³ /s
ADW_sgm1 (inlaat)	0,51	0,93	1,14
ADW_sgm2 (zandvang)	0,40	0,49	0,63
ADW_Sgm3	0,38	1,16	1,28
ADW_Sgm4	0,37	0,57	0,63
ADW_Sgm5	0,31	0,57	0,54
ADW_Sgm6	0,29	0,34	0,34
ADW_Sgm7	0,62	0,21	0,25
ADW_Sgm8 (uitlaat)	0,79	0,55	0,57

Hieruit concluderend zou in de nevengeul bij de hoge afvoeren de erosie lager uit kunnen vallen. SOBEK overschat waarschijnlijk de hoeveelheid erosie en onderschat, ook als gevolg van de lagere stroomsnelheden, de hoeveelheid sedimentatie. Het geeft echter wel een goede identificatie waar kans op erosie is.

De erosie van mogelijk verontreinigd bodemmateriaal in de nevengeul is een belangrijk punt. Daarom is ter controle van het SOBEK-model van de nevengeul een exercitie met GIS voor een gemiddelde afvoer ertgevoerd en met behulp van WAQUA gekeken naar een situatie met een hoge afvoer.

M.b.v. GIS is op een andere manier dan in SOBEK de stroomsnelheid in de nevengeul berekend. Daarvoor is m.b.v. GIS het doorstroomoppervlak in de nevengeul onder het waterstandniveau bij gemiddelde afvoer bepaald. Met de bekende afvoer door de nevengeul kan nu de stroomsnelheid in de nevengeul bepaald worden ($Q=v \cdot A$). Aan de hand van deze snelheden en de kritische snelheid voor erosie (0,5 m/s) is in figuur 5.10 ruimtelijk aangegeven waar er kans op erosie bestaat.

Figuur 5.10

Erosie van slib in de nevengeul bij gemiddelde afvoer.

Erosie slib bij gemiddelde sfvosr
AMMtneb»mi OaMttchaWunton



In figuur 5.10 is te zien dat bij gemiddelde Waalafvoer ($1662 \text{ m}^3/\text{s}$) en een kritische stroomsnelheid voor erosie van $0,5 \text{ m/s}$ er geen erosie in de nevengeul optreedt (er zijn geen rode vlakken te zien). Dit geven ook de SOBEK-berekeningen aan. Bij een afvoer van $1578 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt er geen erosie berekend (zie figuur 5.9) Bij een afvoer van $1786 \text{ m}^3/\text{s}$ is dit wel het geval in de segmenten ADW_sgm3 en ADW_sgm5 (zie figuur 5.9 en 5.1).

Rond de kritische stroomsnelheid voor erosie zit een bepaalde onzekerheidsband. In het Noordelijk Deltabekken wordt over het algemeen (Van Wijngaarden, 1998) een kritische stroomsnelheid voor erosie aangehouden van $0,5 \text{ m/s}$ met als marge zo'n 10% (minimale erosie bij $0,4 \text{ m/s}$ en maximale erosie bij $0,6 \text{ m/s}$). In het rivierengebied wordt een andere range aangehouden. Bij een zandige bodem wordt aangehouden dat er erosie optreedt bij ca $0,3 \text{ m/s}$, terwijl er bij een kleibodem pas erosie op gaat treden bij een stroomsnelheid van ca $0,8 \text{ m/s}$. Omdat de kritische stroomsnelheden voor erosie voor het Noordelijk Deltabekken binnen de range van het rivierengebied valt wordt in het verdere onderzoek uitgaan van de range $0,3 - 0,8 \text{ m/s}$. Deze grenzen zijn ook in figuur 5.10 weergegeven. Zo blijkt uit figuur 5.10 dat er bij gemiddelde afvoer er in het grootste deel van de nevengeul, bij welke bodemsoort dan ook, geen erosie optreedt (groene gedeeltes). De stroomsnelheden zijn hier kleiner dan $0,3 \text{ m/s}$. In vier gedeeltes van de nevengeul (oranje) kan er mogelijk erosie optreden indien de bodem wat zandig van aard is. Die vier gedeeltes van de nevengeul (oranje) zijn de inlaat, net na het regelwerk, het midden en de uitstroom. De berekende stroomsnelheden liggen in deze gedeeltes tussen de $0,3$ en $0,5 \text{ m/s}$.

Wanneer we nu kijken naar de textuurkaarten van het toekomstig maaiveld (MAW-2003-239-T2, MAW-2003-232-T2 en MAW-2003-

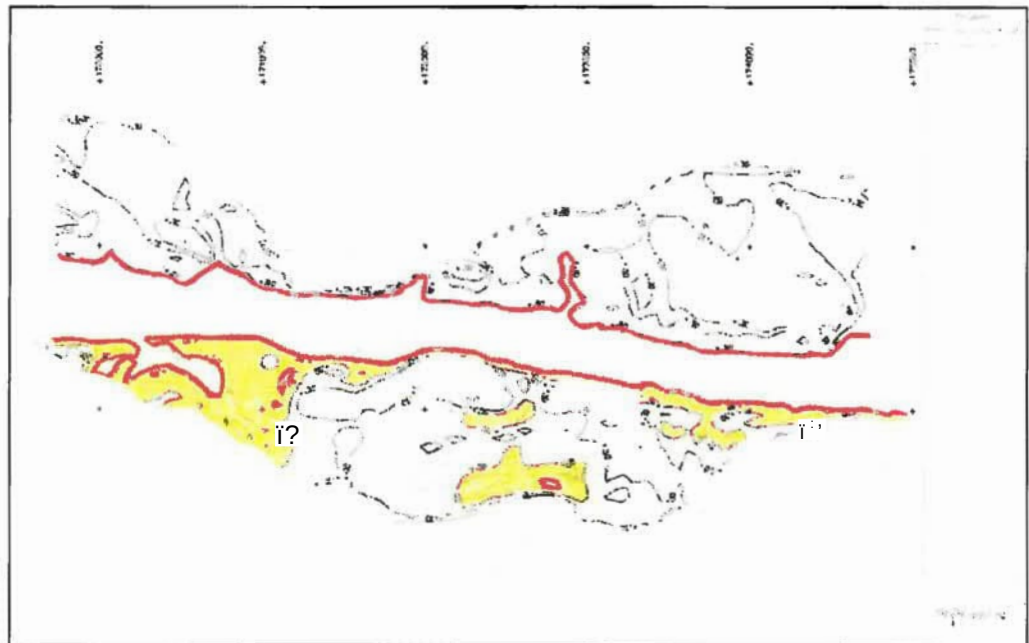
237-T2), dan zien we dat er in deze gebieden (uitgezonderd het midden van de nevengeul (deelgebied 4), hier zijn geen gegevens van beschikbaar) niet alleen slib wordt aangetroffen, maar ook zand. De bodem is blijkbaar zandig van aard en er bestaat dus de kans dat er mogelijk erosie in deze gebieden optreedt bij gemiddelde afvoer.

5.3.5. Erosie bij extreem hoge afvoeren in de uiterwaard

In figuur 5.11 en 5.12 zijn bij een hoge Bovenrijnafvoer ($10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) met behulp van isolijnen van de stroomsnelheden de erosiegevoelige gebieden in de uiterwaard aangegeven zoals die door WAQUA worden berekend. In figuur 5.11 is dit weergegeven voor de huidige situatie en in figuur 5.12 voor de toekomstige situatie.

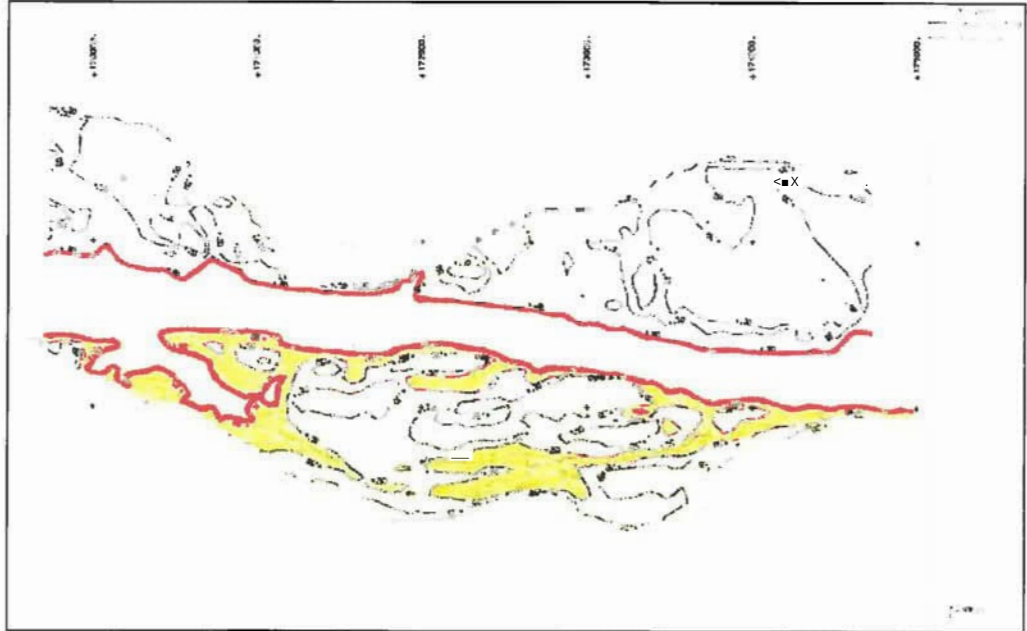
Figuur 5.11

Isolijnen van stroomsnelheden van 0,3 m/s, 0,5 m/s en 0,8 m/s in de Aferdensche en Deetsche waarden voor de huidige situatie bij een Bovenrijnafvoer van $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figuur 5.12

Isolijnen van stroomsnelheden van 0,3 m/s, 0,5 m/s en 0,8 m/s in de Afferdensche en Deetsche waarden voor de toekomstige situatie bij een Bovenrijnafvoer van 10.000 m³/s.



Bij een afvoer van 10.000 m³/s is de uiterwaard overstroomd en de stroomsnelheid is over bijna de gehele uiterwaard groter dan 0,3 m/s. Aannemende dat de gehele uiterwaard begroeid is zal dit hier geen erosie tot gevolg hebben. In de nevengeul is de kans op erosie wel aanwezig.

De kans op erosie in de met geel aangegeven gebieden, waar de berekende stroomsnelheden tussen de 0,5 m/s en 0,8 m/s liggen, is vrij groot. In de gedeeltes van de uiterwaard daar waar begroeiing aanwezig is en daar waar de bodem kleiig is zal er geen erosie optreden. In de nevengeul zal dit wel het geval zijn. Aangezien de bodem van de nevengeul zandig van aard is (textuurkaarten van het toekomstig maaiveld MAW-2003-239-T2, MAW-2003-232-T2 en MAW-2003-237-T2) en de stroomsnelheden ter plaatse van de nevengeul voor het grootste gedeelte rond de 0,5 m/s of meer bedragen is de kans op erosie in de nevengeul bij een hoge afvoer vrij groot.

In de met rood omrande gebieden (0,8 m/s of hoger) treedt bij een afvoer van 10.000 m³/s erosie op.

Wanneer de figuren 5.11 en 5.12 met elkaar vergeleken worden blijkt dat daar waarin de toekomstige situatie de nevengeul loopt er meer erosie op kan gaan treden dan in hetzelfde gebied in de huidige situatie.

Wanneer we kijken naar verontreinigingen dan zitten de verontreinigingen meer aan slibachtig materiaal dan aan zand. Dit meenemende zou dus alleen bij hoge afvoeren erosie plaats kunnen vinden (snelheden > 0,5 m/s) en zijn de in figuur 5.12 aangegeven geïsoleerde gebieden de mogelijke erosiegevoelige gebieden in de toekomstige situatie (afhankelijk van wel of geen begroeiing, zie hierboven).

5.4 Resultaten lange termijn

Voor de korte termijn voorspelling (enkele jaren) van de zwevend stofsedimentatie in de nevengeul is gebruik gemaakt van het sedimentatie en erosie-spreadsheetmodel dat gemaakt is bij de studie naar het sedimentatie- en erosieproces in de grote geul van Gamarren (Visser A.Z., 2004). Voor de hele lange termijn voorspelling (tientallen jaren) is het model echter niet geschikt, omdat de verandering van het doorstroomprofiel, en dan met name de breedte, niet in het spreadsheetmodel kan worden doorgevoerd.

In het model wordt voor elk segment de bij de verschillende afvoeren door SOBEK berekende zwevend stofgehalten, hoeveelheden sedimentatie en erosie, afhankelijk van de frequentie van voorkomen van de desbetreffende afvoer, omgerekend naar op jaarbasis. Uit de totale sedimentatie/erosie per jaar voor elk segment kan vervolgens de dikte van de sedimentatie- of erosielag per jaar met behulp van een opgegeven bodemdichtheid worden berekend.

De sedimentatie van vooral grof slib en fijn zand in de nevengeul vindt vooral plaats tijdens lage afvoeren. Bij hoge afvoeren treedt in bepaalde delen van de nevengeul erosie op. Op jaarbasis bekeken is de netto sedimentatie/erosie nu het gecombineerde effect van hoge en lage afvoeren.

De hoeveelheid sedimentatie van het zwevend stof in de nevengeul blijft beperkt tot zo'n 10.000 m³ per jaar. In de verschillende modelsecties van de nevengeul ligt de netto sedimentatie in de diepere delen van het profiel tussen de 0,01 en 0,05 m/jaar. Verder geeft het model aan dat de sedimentatie bestaat uit fijn zand (50-60%) en grof slib (40-50%), met uitzondering van segment ADW_Sgm5, waar het percentage fijn zand hoger is en het slibpercentage lager (70% om 30%), en segment ADW_Sgm7, waar het slibpercentage hoger is dan het fijn zandpercentage (60% om 40%).

Netto erosie (= erosie - sedimentatie) in de nevengeul vindt alleen maar plaats in de segmenten ADW_Sgm3, orde 0,09 m na 1 jaar tot 0,02 a 0,03 m na 10 jaar (schatting), en ADW_Sgm1 (inlaat), orde 0 tot 0,01 m per jaar.

De verwachte ontwikkeling van de nevengeul is dat deze heel langzaam zal sedimenteren, uitgezonderd het gedeelte (ADW_sgm3) net na het regelwerk. Dit gedeelte zal nog wel een aantal jaren langzaam eroderen.

5.5 Opmerkingen

Bij modelberekeningen met zwevend stof wordt in de meeste gevallen als zwevend stof randvoorwaarde het gemeten gehalte bij Lobith aangehouden, aannemende dat op het tussenliggende traject vanwege de hoge stroomsnelheid geen sedimentatie optreedt. Echter uit de studie van de nevengeul van Gameren bleek dat de gehalten aan zwevend stof gemeten in de inlaat van de grote geul aldaar sterk afwijken van de gehalten gemeten bij Lobith. In de inlaat van de grote geul van Gameren is het gehalte zwevend stof een factor 1,75 hoger dan bij Lobith. Een eenduidige verklaring is gezien het ontbreken van gemeten gehalten in de rivier en het kribvak bovenstrooms van de inlaat niet mogelijk.

De sedimentatie in de nevengeul door de Afferdensche en Deestsche waarden op basis van het zwevend stofgehalte bij Lobith wordt mogelijk onderschat. Bij toepassing van de correctie op de zwevend stofrandvoorwaarde zou dat op jaarbasis een extra sedimentatie opleveren in de inlaat en zandvang van 1 a 2 cm en in de rest van de nevengeul 0 tot 1 cm.

In de modelberekeningen is de correctie op basis van de ervaring bij Gameren niet toegepast.

In de loop van het project is het ontwerpprofiel van de nevengeul aangepast. Vanaf 6,5 m + NAP is de oever aangepast met een talud van 1:10 tot aan huidig maaiveld.

Deze wijziging in het ontwerp is niet in de schematisatie (cross sections) van het SOBEK-model aangepast. Deze wijziging gaat pas spelen bij hoge afvoeren, wanneer de nevengeul uit zijn oevers loopt. Op dat moment zal dan het gedeelte van het maaiveld met het talud 1:10 gaan functioneren als bergend oppervlak. Tevens is de verwachting dat dit gedeelte, wat niet zo vaak zal overstromen, begroeid zal raken en op zo'n manier ook weinig stroomvoerend zal bijdragen. Het stromende gedeelte van de nevengeul zal nog steeds de geul zijn zoals dat nu in het SOBEK-model geschematiseerd is, alwaar dus ook voornamelijk het sedimenttransport, de sedimentatie en erosie, zal plaatsvinden.

5.6 Conclusies

Op grond van de SOBEK-berekeningen van de nevengeul kan geconcludeerd worden dat er zowel erosie als sedimentatie in de nevengeul gaat plaatsvinden. Erosie in de nevengeul gaat optreden bij Waalafvoeren hoger dan de gemiddelde Waalafvoer, uitgaande van een kritische stroomsnelheid voor erosie van 0,5 m/s. Erosie vindt voornamelijk plaats in het segment ADW_Sgm3, het gedeelte net na het regelwerk gelegen aan het einde van de zandvang. Ook vindt erosie plaats in de inlaat van de nevengeul (segment ADW_Sgm1). Naast erosie treedt in mindere mate in deze delen van de nevengeul ook sedimentatie van zwevend stof op. De netto erosie bedraagt voor segment ADW_Sgm3 zo'n 0,09 m na 1 jaar, maar neemt in de loop der jaren af en voor segment ADW_Sgm1 0 tot 0,01 m per jaar. In het

middengedeelte (segment ADW_Sgm5) van de nevengeul treedt bij hogere afvoeren zowel sedimentatie als lichte erosie op. De sedimentatie is daarbij groter dan de erosie. Zeker op jaarbasis gezien overheerst voor dit gedeelte de sedimentatie van het zwevend stof. Wordt er uitgegaan van een zandige bodem, waarbij een kritische stroomsnelheid voor erosie van 0,3 m/s wordt aangehouden, dan kan er bij afvoeren rond de gemiddelde Waalafvoer ook in bovenstaande gedeeltes en in de uitlaat van de nevengeul erosie optreden. Bij uiterwaard overschrijdende afvoeren zal met name ter plaatse van de nevengeul erosie optreden. In de gedeeltes van de uiterwaard waar begroeiing aanwezig is en/of een kleibodem aanwezig is, zal geen erosie optreden.

Uitgezonderd in segment ADW_Sgm1 en segment ADW_Sgm3 treedt in vrijwel de gehele nevengeul netto sedimentatie van het zwevend stof op. De sedimentatie vindt voornamelijk plaats in de zandvang, ongeveer 0,05 m/jaar. In de rest van de nevengeul bedraagt de sedimentatie zo'n 0,01 t/m 0,02 m/jaar. De hoeveelheid sedimentatie van het zwevend stof in de nevengeul blijft beperkt tot zo'n 10.000 m³ per jaar.

6. Sedimentatie in de zandvang

6.1 Inleiding

Voor de herinrichtingsmer van de Afferdensche en Deestsche uiterwaarden moet een schatting worden gemaakt van de sedimentatie tijdens gemiddelde afvoeren in de zandvang van de geplande nevengeul. In dit hoofdstuk wordt van de sedimentatie als gevolg van bodemtransport en zwevend stoftransport een indicatie gegeven. In het Technisch Ontwerp Inrichting Afferdensche en Deestsche Waarden (Molenkamp, 2003) wordt aangegeven dat in feite niet gesproken moet worden over een zandvang, maar over een zwevend sedimentvang. Deze benaming spreekt het grote publiek echter niet aan en het woord slibvang heeft een te negatieve uitstraling, daarom is tijdens informatieavonden het woord zandvang gebruikt met daarbij wel steeds de uitleg dat het gaat om zwevend materiaal.

Allereerst wordt nu een indicatie gegeven van de sedimentatie in de zandvang als gevolg van bodemtransport. Opgemerkt wordt dat, in situaties met gemiddelde rivierafvoer, de snelheid van de aanzanding in nevengeulen vooral afhankelijk zal zijn van:

- lokale, gemiddelde stroomsnelheden en turbulente patronen in het kribvak en lokaal in de hoofdgeul
- wervels gegenereerd door de nabijgelegen (bovenstroomse kribkop)
- golven/waterspiegeldalingen in kribvak en hoofdgeul opgewekt door scheepvaartbewegingen
- het type transport (overwegend zwevend transport)

Dit alles leidt tot bijdragen van verschillende complexe processen op vergelijkbare tijd en ruimteschaal. De voorspelbaarheid van aanzanding is dan ook niet groot; dit geldt hier ook voor geavanceerder, numerieke modellen van sediment transport. In deze memo wordt daarom gebruik gemaakt van een empirische relatie voor aanzanding, die niet geverifieerd is voor nevengeulopeningen in kribvakken.

De theoretische verwachting is dat de hoogte van de aanzanding in de zandvang zonder ingrijpen groeit tot het kruinniveau van de inlaat. De aanzanding verplaatst zich in stroomrichting door de zandvang met een sedimentfront ("schokgolf"). De snelheid hiervan kan een functie zijn van het hoogteverschil tussen kruinniveau en initiële zandvangbodem.

6.2 Empirische relatie

De aanzanding in de nevengeul is afhankelijk van het sedimenttransport in stroombanen die naar de nevengeul leiden (en de "Bulle"-bijdrage door kromming). De inlaat kan worden beschreven als een splitsingspunt. Overeenkomstig Wang en Van der Kaaij (1994) wordt daarom een splitsingspuntrelatie gebruikt van de vorm

$$\frac{S_n}{S_h} = \left(\frac{B_n}{B_h} \right)^{1-k} \left(\frac{Q_n}{Q_h} \right)^k \quad (6.1)$$

Met

B_n	[m]	inlaatbreedte van de nevengeul (circa 50 m)
B_h	[m]	breedte van de hoofdgeul (circa 260 m)
k	[-]	empirische coëfficiënt
S_n	[m ³ /s]	sedimentaanbod aan de nevengeul
S_h	[m ³ /s]	restant sedimenttransport in de hoofdgeul
Q_n	[m ³ /s]	afvoer door de nevengeul
Q_h	[m ³ /s]	restant afvoer door de hoofdgeul

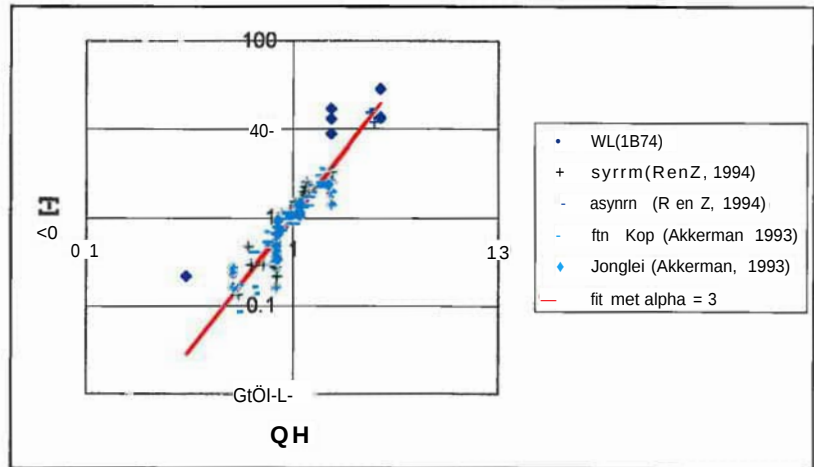
Deze formule (Verg. 6.1) is door de sterke vereenvoudiging van lokale fysische processen vooralsnog een hypothese die een indicatie geeft van de aanzanding. De waarde van k kan enigszins worden onderbouwd met Fig. 6.1, waar de relatie tussen sediment- en afvoerverdeling voor verschillende sets van prototypemetingen en modelproeven zijn vergeleken. Door de waarden uit elke dataset te normeren met een bijbehorende referentie, kan Verg. 6.1 worden getransformeerd naar

$$s \gg q^k; s = \frac{S_1 / S_2}{S_{1ref} / S_{2ref}}; q = \frac{Q_1 / Q_2}{Q_{1ref} / Q_{2ref}} \quad (6.2)$$

Hierdoor wordt het mogelijk om de verschillende configuraties met elkaar te vergelijken. De algemene trend is enigszins weergegeven met $k \sim 3$. De grote spreiding van de data (nb. dubbel logaritmische assen !) geeft aan dat Verg. 6.2 niet erg nauwkeurig is.

Figuur 6.1

Vergelijking empirische splitsingspuntrelatie met waarnemingen.



6.3 Jaarlijkse aanzanding zonder hoogwater

Door de splitsingspuntrelatie (Verg. 6.2 met $k=3$; $B_n=50$ m en $B_h=260$ m) te combineren met de afvoergegevens, kan een indruk worden gegeven van het jaarlijkse sedimentaanbod aan de nevengeul. Dit wordt als volgt gedaan. Met Verg. 6.2 kan het aanbod aan de IJssel worden geschreven als

$$S_n = \frac{\left(\frac{X}{B_h}\right)^{-2} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^3}{\left(\frac{B_n}{B_h}\right)^{-2} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^3 + 1} S_{Waal} \text{ met } \alpha = \frac{Q_n}{Q_w} \quad (6.3)$$

Als nu S_w , het transport in de Waal wordt geschat met een machtswet $S = m u^n$ met m en n empirische coëfficiënten, dan kan met de wet

$$\text{van Chézy worden afgeleid } S = S_{ref} \left(\frac{Q_w}{Q_{ref}}\right)^{y/3} \text{ met } O(n) = 5 \quad (6.4)$$

De jaarlijkse zandvracht door de Waal kan dan gedefinieerd worden door Verg. 6.4 te integreren met

$$V_w = \frac{n}{C_U V} \int_{Q_{ref}}^{Q} P(Q_w) dQ_w \quad (6.5)$$

Hierin is $p(Q_w)$ de jaarlijkse kans van voorkomen van afvoer Q_w . De constanten S_{ref} en Q_{ref} kunnen met Verg. 6.5 geschreven worden als

$$\frac{z}{u} \frac{n}{C_U V} = \frac{1}{V_w} \int_{Q_{ref}}^{Q} p(Q_w) dQ_w \quad (6.6)$$

Door Verg. 6.3 te integreren over een jaar, en Verg. 6.4 en 6.6 in te vullen, kan worden gevonden voor de jaarlijkse aanzanding in de nevengeul

$$\frac{V_n}{V_w} = \left(\frac{B_n}{B_h} \right)^{1-k} \frac{\int_{Q_{wi}}^{Q_{mw}} \frac{\left(\frac{\alpha}{r} \right)^k}{\left(\frac{B_h}{B_n} \right)^{1-k}} \frac{1}{U-aJ} p(Q_w) dQ_w}{Jq_w^{1/3} p(q_w)} \quad (6.7)$$

Met de afvoerwaarden en overschrijdingskansen uit Tabel 4.3 uit hoofdstuk 4 (met een maximale nevengeulafvoer van 3%) en met $k = 3$ en $n = 5$ wordt gevonden dat de jaarlijkse aanzanding in de nevengeul wordt geschat op 0,08 % van V_w , de jaarlijkse zandvracht door de Waal. Met $V_w = 500.000 \text{ m}^3$ betekent dit $V_n = 400 \text{ m}^3$ (0,16 m over een oppervlak van 50 m x 50 m). De onzekerheid in de empirische splitsingspuntrelatie (Verg. 6.1) is behoorlijk groot;

- de grootste bijdrage aan de gemiddelde aanzanding is te verwachten bij hogere Waalafvoeren; een spreiding in de nevengeulafvoer in dit afvoerdomein leidt tot grote variatie in de geschatte aanzanding *)
- in de geschatte jaarlijkse zandvracht zit een spreiding van $\pm 60\%$.
- Verg. 6.1 is gebaseerd op splitsingspunten waarbij de takken directe met elkaar zijn verbonden. De invloed van (door scheepvaart opgewekte) golven en stroming op het sedimentaanbod naar en door het kribvak met de nevengeulinlaat is onbekend.

*) Als niet maximaal $a=0,03$ wordt gebruikt, maar onveranderd de nevengeulafvoer uit Tabel 4.3 wordt ingevuld met $a=0,07$ bij een Waalafvoer van $2635 \text{ m}^3/\text{s}$, dan neemt de geschatte aanzanding volgens Verg. 6.7 met een factor 10 toe.

Verbetering van de voorspelling met bureaustudies lijkt nauwelijks mogelijk; de huidige operationele modellen voor sedimenttransport zijn hiervoor niet toereikend.

6.4 Sedimentatie tijdens hoogwater

Deze schatting is exclusief de sedimentatie door sedimentrijke instroming van de uiterwaard tijdens hoogwater die niet via de inlaat in de zandvang terechtkomt. Deze zone wordt overstroomd bij Bovenrijnafvoeren groter dan circa $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$, wat in de periode 1900-1999 jaarlijks gemiddeld 6,5 dag voorkomt. In Sorber (1997) wordt gerapporteerd dat tijdens de hoogwaters in 1993/1994 en 1995

op de linker Waaloever ter plekke van de huidige zandvang, sedimentatie plaatsvond.

Tabel 6.1

Geschatte sedimentatie ter plekke van de zandvang tijdens hoogwater.

Jaar	overstromings- duur [dg]	lokatie km	sedimentatie- oppervlak [m ²]	sedimentatie- dikte [m]	sed. snelheid [m/dg]
1993/1994	20	899.045-988.395	3975	0,024	0,001
1995	13	898.580-898.700	3206	0,080	0,006
Gemiddelde	16,5			0,104	0,004

De waarnemingen in Tabel 6.1 leveren een empirische referentie waarde voor de gemiddelde sedimentatiesnelheid tijdens hoogwater van $w_{ref} = 0,004$ m per dag overstroming. Aangenomen wordt dat de snelheid van deze zichtbare sedimentatie overeenkomt met de snelheid van de niet-zichtbare sedimentatie in de zandwinplas ter plekke van de zandvang. De jaargemiddelde hoogwatersedimentatie azh bij een overstromingsduur van 6,5 dag is dan

$$\Delta z_h \approx w_{href} \cdot t = 0,004 \cdot 6,5 = 0,026 \text{ m. Veronderstel dat deze}$$

sedimentatie plaatsvindt over een oppervlak van circa 3000 m² (Tabel 6.1), dan is de geschatte jaargemiddelde hoogwatersedimentatie 78 m³.

Dit getal is gebaseerd op onveranderde hydraulische condities. Als na herinrichting daarentegen de uiterwaardafvoer met circa 10% toeneemt, dan mag worden verwacht dat ook de sedimentatie tijdens hoogwater ter plekke van de zandvang navenant groter wordt. Veiligheidshalve wordt de toekomstige hoogwaterbijdrage aan de jaargemiddelde aanzanding ter plekke van de zandvang geschat op 86 m³.

De jaargemiddelde bijdrage van hoogwatersedimentatie door stroming buiten de inlaat om is dus minder significant dan de *jaargemiddelde* aanzanding die de zandvang via de inlaat ontvangt.

6.5 De totale sedimentatie in de zandvang

Op basis waargenomen hoogwatersedimentatie (§6.4) en met behulp van een empirische relatie (§6.3) wordt geschat dat de grootte van de jaarlijkse aanzanding in de zandvang van de nevengeul circa 500 m³ bedraagt. Ook is in deze paragrafen aangegeven dat deze schatting onnauwkeurig is. Wordt het geschatte volume van de aanzanding toch verdeelt over het oppervlak van de zandvang dan zou dat neerkomen op een aanzanding van ongeveer 0,01 m/jaar.

In de zandvang sedimenteert niet alleen het zand dat over de bodem van de Waal de nevengeul in wordt getransporteerd, maar ook het zwevend stof. De sedimentatie in de zandvang als gevolg van het zwevend stoftransport (hoofdstuk 5) wordt geschat op 0,05 m per jaar, waarbij opgemerkt moet worden dat uiterwaard overschrijdende hoge afvoeren niet in de berekening zijn meegenomen.

De totale sedimentatie van zowel bodemtransport als zwevend stoftransport zou dan ongeveer 0,06 m/jaar bedragen. Het

gesegmenteerde sediment zal zich echter niet gelijkmatig verdelen over het hele oppervlak van de zandvang, maar zich in de stroomrichting door de zandvang met een sedimentfront verplaatsen.

Vanwege het niet halen van de saneringsdoelstelling wordt er gedacht om de zandvang een meter extra te verdiepen. Deze verdieping heeft op de sedimentatie van het zwevend stof niet veel effect. De sedimentatiehoeveelheid neemt wel iets toe als gevolg van nog lagere stroomsnelheden. Maar de stroomsnelheden in de zandvang waren al zo laag zodat de toename heel licht is. Op jaarbasis blijft de geschatte hoeveelheid sedimentatie 0,05 m/s. Wel zal het uiteraard langer duren voor de zandvang vol is.

7. Erosie in de zandwinplas

7.1 Inleiding

Bij de herinrichting van de Afferdensche en Deedtsche waarden zal de in de uiterwaard gelegen zandwinplas gebruikt gaan worden als depot voor de afgegraven verontreinigde grond. In de voor de herinrichting benodigde MER moet aangegeven worden in hoeverre erosie kan optreden in de zandwinplas, bij toekomstig gebruik als depot. Dit is van belang in de vulfase en in de eindfase, na het beëindigen van het storten en tijdens hoge afvoeren.

7.2 Vulfase

Met behulp van een WAQUA-model van een deel van de Waal (Nijmegen - Wamel (nabij Tiel)) is bij uiterwaard overschrijdende afvoeren, 8.000, 10.000 en 16.000 m³/s (afvoer bij Lobith) voor de vulfase gekeken naar de stroomsnelheden ter plaatse van de zandwinplas, zowel in de huidige situatie als in de toekomstige situatie. De berekende snelheden zijn vergeleken met de kritische stroomsnelheid voor erosie. Dit is de stroomsnelheid waarboven er erosie van de waterbodem op kan gaan treden. Over het algemeen ligt de kritische stroomsnelheid in een range van 0,3 m/s (bij zandige bodem) tot 0,8 m/s (bij kleibodem). Omdat het bij de zandwinplas om voorkomen van erosie van verontreinigde grond gaat en de verontreinigingen meer aan het slib zit dan aan het zand, is voor het bepalen van wel of geen erosie een kritische stroomsnelheid van 0,5 m/s aangehouden, (zie ook paragraaf 5.3.4)

Bij een Bovenrijnafvoer van 8.000 m³/s is de stroomsnelheid ter plaatse van de zandwinplas lager dan 0,5 m/s, zowel in de huidige situatie als in de toekomstige situatie. Alleen ter plaatse van het instroomgedeelte is de snelheid hoger dan 0,5 m/s en kan hier dus erosie optreden.

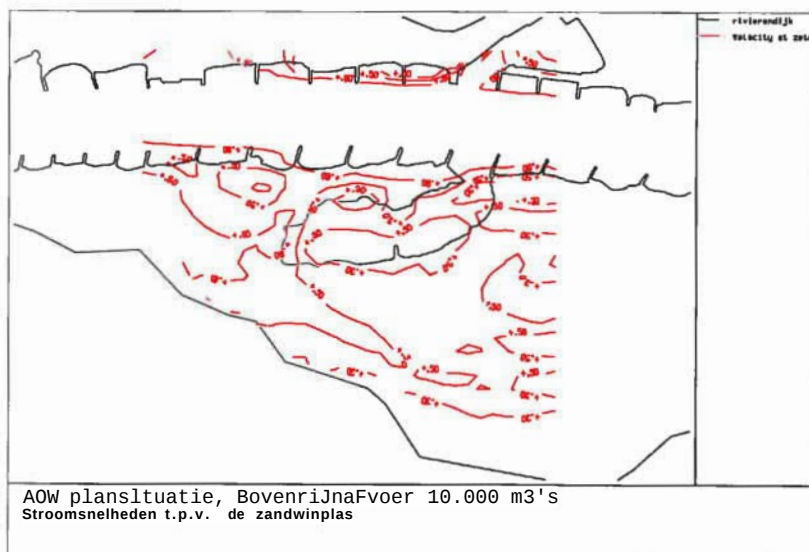
Bij een Bovenrijnafvoer van 10.000 m³/s ligt de zandwinplas in de huidige situatie nog in de luwte van het hoogwatervrij terrein, gelegen bovenstrooms van de zandwinplas. De stroomsnelheden t.p.v. de zandwinplas zijn hoger dan die bij een afvoer van 8.000 m³/s, maar liggen nog steeds onder de kritische stroomsnelheid voor erosie van 0,5 m/s. Alleen het noordelijk gedeelte van de zandwinplas is onder de invloed van de hoge stroomsnelheden van de Waal.

Door afgraving van het hoogwatervrij terrein, in de toekomstige situatie, is de luwte verdwenen en zijn de stroomsnelheden boven de zandwinplas toegenomen. De kritische stroomsnelheid voor erosie

wordt dan toch aardig benaderd (figuur 7.1). Er kan dus lichte erosie op gaan treden.

Figuur 7.1

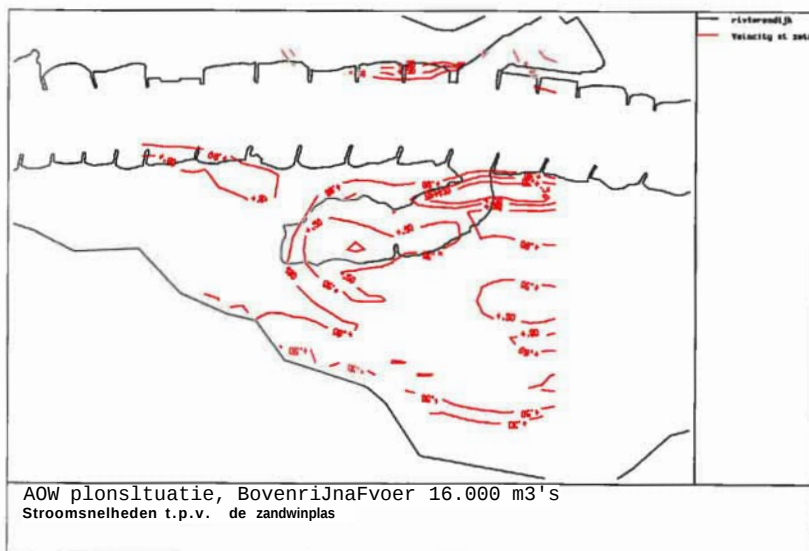
Stroomsnelheden over de uiterwaard bij Afferden en Deest t.p.v. de zandwinplas in de toekomstige situatie bij een afvoer van 10.000 m³/s.



Voor de maatgevende hoogwaterafvoer van 16.000 m³/s geldt in de huidige situatie precies hetzelfde als bij de afvoer van 10.000 m³/s. De zandwinplas ligt in de luwte van het hoogwatervrij terrein. De berekende stroomsnelheden ter plaatse van de zandwinplas blijven onder of schommelen rond de kritische stroomsnelheid voor erosie. In enkele delen van de zandwinplas treedt erosie op. In de toekomstige situatie, met een afgegraven hoogwatervrij terrein, zijn de berekende stroomsnelheden in het grootste deel van de zandwinplas hoger dan de kritische stroomsnelheid voor erosie. In de toekomstige situatie treedt dus bij een afvoer van 16.000 m³/s in meerdere delen van de zandwinplas erosie op (figuur 7.2).

Figuur 7.2

Stroomsnelheden over de uiterwaard bij Afferden en Deest t.p.v. de zandwinplas in de toekomstige situatie bij een afvoer van 16.000 m³/s.



Het storten van de afgegraven verontreinigde grond in de zandwinplas tot een hoogte van -0,5 m NAP gebeurt m.b.v. boten die de zandwinplas binnen varen. Daartoe wordt de ingang van de zandwinplas tijdelijk verdiept.

Bij een afvoer van 10.000 m³/s is er met een WAQUA-berekening gekeken wat de invloed van de verdieping van de ingang op de stroomsnelheden ter plaatse van de zandwinplas is.

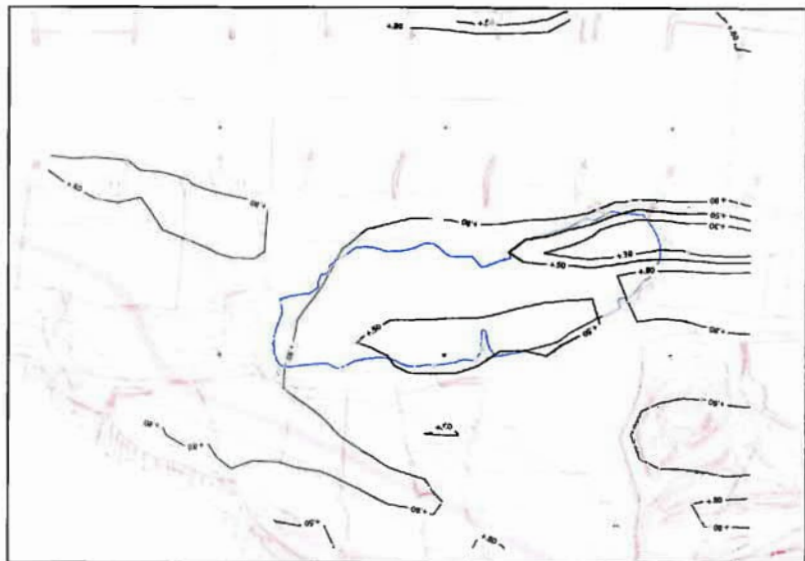
Het effect is minimaal. De isolijn van 0,5 m/s schuift in de oostelijke helft van de plas ca. 10 m naar het zuiden op. Tevens is de isolijn ook wat rechter getrokken, waardoor een kleine kronkel in de isolijn verdwenen is.

7.3 Eindfase

Om na te gaan of in de eindfase, wanneer de zandwinplas opgevuld en afgedekt is, erosie in de zandwinplas kan optreden wordt gebruik gemaakt van de stroomsnelheden van een WAQUA-berekening met de MHW-afvoer van 16.000 m³/s en waarin de bodem van de zandwinplas opgehoogd is tot -0,5 m NAP. Deze berekening is ooit uitgevoerd om na te gaan of de ophoging van de zandwinplas invloed heeft op de MHW. De berekende stroomsnelheden bij de MHW-afvoer van 16.000 m³/s zijn m.b.v. isolijnen (zwarte lijnen) in figuur 7.3 weergegeven. (De locatie van de zandwinplas is met een blauwe lijn aangegeven en de rode lijnen zijn hoogtelijnen.)

Figuur 7.3

Isolijnen van stroomsnelheden van 0,3 m/s, 0,5 m/s en 0,8 m/s ter plaatse van de tot -0,5 m NAP opgevulde zandwinplas in de eindfase bij een Boven rijnafvoer van 16.000 m³/s.



Uit figuur 7.3 blijkt dat de stroomsnelheden in de zandwinplas voor het grootste gedeelte groter zijn dan 0,5 m/s. Er gaat in de zandwinplas dus erosie optreden. Dat is voor bijna de gehele plas het geval indien de bodem een zandige afdekking krijgt. De stroomsnelheden liggen in bijna in de gehele plas boven de kritische snelheid voor erosie bij een zandige bodem (0,3 m/s). Indien de bodem van de zandwinplas

afgedekt wordt met alleen klei dan zal er geen erosie optreden, de stroomsnelheden blijven praktisch in de hele plas onder de kritische snelheid voor erosie bij een kleibodem (0,8 m/s).

7.4 Conclusies

in de zandwinplas kan erosie optreden onder invloed van stroming. Vanwege het relatief geïsoleerde karakter zijn in het geval van de zandwinplas vooral de hoogwaterperioden van belang.

Uit de WAQUA-berekeningen met uiterwaard overschrijdende Bovenrijnafvoeren van 8000, 10000 en 16000 m³/s, zowel in de huidige situatie als in toekomstige situatie, kan voor de vulfase geconcludeerd worden dat er in de zandwinplas een hele scala aan stroomsnelheden voorkomen, van bijna stilstaand water tot snel stromend.

In het noordelijke gedeelte van de zandwinplas, net na de nu nog bestaande verbinding met de Waal, treedt bij alle drie de afvoeren, zowel in de referentie- als toekomstige situatie, erosie op. De stroomsnelheden zijn hier hoger dan de kritische snelheid voor erosie (0,5 m/s).

Bij een afvoer van 8.000 m³/s komen de stroomsnelheden ter plaatse van de zandwinplas niet boven de kritische stroomsnelheid voor erosie uit, zowel in de huidige situatie als in de toekomstige situatie. Er treedt geen erosie op. Bij een afvoer van 10.000 m³/s en in de toekomstige situatie is er wel kans op erosie. De berekende stroomsnelheden liggen dicht in de buurt van de kritische stroomsnelheid voor erosie. Bij de MHW-afvoer van 16.000 m³/s treedt in meerdere delen van de zandwinplas erosie op als gevolg van hoge stroomsnelheden.

In de eindfase, als de zandwinplas opgevuld en afgedekt is, zijn bij de MHW-afvoer van 16.000 m³/s de stroomsnelheden ter plaatse van de zandwinplas voor het grootste gedeelte hoger dan 0,5 m/s. De bodem van de opgevulde zandwinplas is dus bij extreem hoge afvoer onderhevig aan erosie.

Indien de bodem van de zandwinplas een zandige afdekking krijgt (kritische stroomsnelheid van 0,3 m/s) zal bijna de gehele plas onderhevig zijn aan erosie. Indien de bodem afgedekt wordt met klei is er praktisch geen erosie.

Als nu al blijkt dat in de vulfase en in de toekomstige situatie bij een Bovenrijnafvoer van 10.000 m³/s er kans bestaat op erosie, dan zal dat in de eindfase ook het geval zijn. Het doorstroomprofiel wordt tenslotte vernauwd en daardoor gaan de stroomsnelheden omhoog.

8. Aanbevelingen

8.1 Nevengeul

Het ontwerp voor het inrichtingsplan voor de Afferdensche en Deestsche uiterwaarden is verder uitgewerkt naar uitvoeringsaspecten (Molenkamp, 2003). Deze uitwerking heeft een aantal veranderingen t.o.v. het oorspronkelijke inrichtingsplan met zich mee gebracht. Van een aantal veranderingen is vanuit rivierkundig oogpunt het effect onduidelijk of nog onvoldoende onderbouwd. De onderzoeksvragen van deze veranderingen zijn in de nota van Technische Ontwerp aangegeven. De belangrijkste zijn:

- a. Instroomopening.
 - De instroomopening is gewijzigd t.o.v. het oorspronkelijke ontwerp. Er is door RWS RIZA rivierkundig onderzoek uitgevoerd naar de meest optimale (beperking sedimentlast geul) instroomopening. De resultaten hiervan zouden verwerkt kunnen worden in het technisch ontwerp.
 - De ervaring bij Gameren leert dat de oevers bij de instroomopening gevaar lopen te eroderen. Dit is vanuit het rivierbeheer niet toelaatbaar (ongecontroleerde instroming en achterloopsheid kribben). In het Technisch ontwerp moeten geschikte oeververdediging worden opgenomen.
- b. Hoogte bodem nevengeul.

De stromende nevengeul is ontworpen als permanent stromend. De ontwerphoogte van de geulbodem verloopt van 3,5 m+NAP t.p.v. de instroming naar 3,1 m+NAP t.p.v. de uitstroming. Door de nog steeds optredende erosie van de Waalbodem zijn de waterstanden in de afgelopen jaren lager geworden. Bij het ontwerp is uitgegaan van de laagst gemeten waterstand namelijk 3,5 m+NAP (kmr 899) en 3,15 m+NAP (kmr 902.5) (zie nota Inrichtingsplan 1996). In de huidige situatie zijn deze waterstanden gedaald. Door waterstanden statistisch te analyseren kan voor verschillende scenario's de bodemhoogte van de nevengeul geëvalueerd worden.
- c. Afvoerreguleringswerk nevengeul.
 - Het dwarsprofiel van de nevengeul is in vergelijking met het oorspronkelijke ontwerp gewijzigd. De redenen zijn het al uitgevoerde middendeel door Delgromij met een ander profiel en het uitgangspunt van het niet opvullen van bestaande plassen. De vraag is of het afvoerregelwerk nog wel voldoet aan de gestelde eisen t.a.v. de maximale nevengeulafvoer.
 - Het huidige ontwerp geeft weinig praktische mogelijkheden tot bijsturing van de afvoerregeling. Voorgesteld wordt om uit te zoeken op welke wijze dit mogelijk gemaakt kan worden.

-
- De kenmerken van het theoretische afvoerregelwerk in de berekening van de nevengeulafvoer worden in het Technisch ontwerp niet geheel overgenomen. Of het regelwerk volgens het Technisch ontwerp nog voldoende functioneert zou uitgezocht moeten worden.
- d. Uitstroomopening.
- De vormgeving van de uitstroomopening is ook gewijzigd. De overgebleven vraag is of de oevers en kribben (geulzijde) voldoende verdedigd zijn.

8.2 Zandwinplas

Uit de WAQUA-berekeningen (hoofdstuk 7) blijkt dat het hoogwatervrij terrein een gunstige invloed, lagere stroomsnelheden, heeft op de stroomsnelheden in de zandwinplas. En lage stroomsnelheden is weer van belang tijdens het vullen van de zandwinplas. Aangeraden wordt dan ook om het hoogwatervrij terrein pas af te graven wanneer de zandwinplas gevuld en afgedekt is.

Literatuur

- Akkerman, G.J., 1993. Zandverdeling bij splitsingspunten; Literatuurinventarisatie voor inlaten van nevengeulen. Report Q1573, Waterloopkundig Laboratorium.
- Bos, M.G., 1976. Discharge measurement structures.
- Brater, E.F. en H.W.King, 1976. Handbook of hydraulics, for the solution of hydraulic engineering problems, 6^{de} editie, McGraw-Hill Book Company,
- Fioole, A., E.J.Houwing, T.Visser, 2002. Sedimentbalans 1960-2000 zwevend stofvracht Rijn en Maas. RIZA-werddocument 2002. 197X, Dordrecht, november 2002.
- Groen, M., 2003. Persoonlijke communicatie.
- Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij, 1997. Scour manual, Balkema, Rotterdam /Brookfield.
- Krone, R.8., 1962. Ftume studies of the transport of sediments in estuarial shoaling, Final Report, Hydr. En. Lab. And San. Eng. Res. Lab., University of California, Berkely, VS.
- Ludikhuize, D. en E.F.W. Ruygh, 1989. Waterkwaliteitsonderzoek van het Noordelijk Deltabekken, slibtransport Hollandsch Diep/Haringvliet. Waterloopkundig Laboratorium, T262, oktober 1989.
- Meyer-Peter, E. en R. Muller, 1948. Formulas for bed-load transport. Proceedings IAHR, Stockholm, Vol.2, paper 2, pp 39-64.
- Mirtskhoulava, Ts. Ye., 1991. Scouring by flowing water of cohesive and noncohesive beds, Journal of Hydraulics Research, IAHR, Vol. 29, No.3.
- Molenkamp, L., 2003. Technisch Ontwerp inrichting Afferdensche en Deestsch Waarden. Versie 28 april 2003/versie 22 mei 2003.
- Partheniades, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils, ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 91, No. HY1, pp 105-139.
- Roosjen, R. & C. Zwanenburg, 1995. Research on bifurcations in rivers, afstudeerrapport, Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek.
- Sieben, J., 2003. Morfologische effecten van PKB strategieën, RIZA werkdokument 2003.105x

Sloot, J.S. en G.A. van den Berg, 2000. Evaluatie instellingen regionaal model Zuidrand Noordelijk Deftabekken. RIZA-werkdocument 99.1 03X, Dordrecht, december 2000.

Snippen, E., L.M. van der Heijdt, J.W. van Zetten, 2002. Abiotisch effectonderzoek Sliedrechtse Biesbosch, , RIZA-rapport 2002.044, Dordrecht, november 2002.

Sorber, A. M., 1997. Oeversedimentatie tijdens de hoogwaters van 1993/1994 en 1995, RIZA rapport 97.015.

Taal, M., 1995. Een basisontwerp vooreen nevengeul in de Afferdensche en Deestsche Waard langs de Waai, RIZA nota 95.047, met bijlagen.

Ten Brinke, W.B.M., 2000. Dwarsdoorsnede-gemiddelde bodemligging en baggergegevens Rijntakken. Periode 1900-2000 compleet, cd-rom, RIZA.

Van Wijngaarden, ir. M., 1998. Sedimentatie en erosie van zwevend stof in nevengeulen. RIZA-rapport 97.078, Lelystad, januari 1998.

Van Wijngaarden, ir. M. en ir. D. Ludikhuize, 1998. MER Beheer Haringvlietsluizen, deelrapport Morfologie en kwaliteit binnengebied. RWS apv 98/094, december 1997.

Visser A.Z., 2004. Een eenvoudig slibmodel van de Grote geul van Gameren, ontwikkeling en toepassing. RIZA-werkdocument 2004.060X, Dordrecht, maart 2004.

Vos, T.C., 2003. Hoogwaterberekeningen, DON ANSR brief d.d. 26-09-03 met beschrijving berekeningen, resultaten en CD rom.

Waterloopkundig Laboratorium, 1974. Maas-Waal centrale. Invloed van het onttrekken en terugvoeren van koelwater op de bodemligging en waterbeweging van de Waal. Verslag modelonderzoek M1102.

WL, 1998. Samengestelde overiaten, vispassagesDriel, Amerongen en Hagestein, Q2393.

