

INRICHTING ZUIDELIJKE LEKUITERWAARDEN

Rivierkundig advies inzake nevengeul ontwerpplan Vianen

Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland

JULI 2000

Barbarossastraat 35
Postbus 151
6500 AD Nijmegen
Telefoon (024) 328 42 84
Telefax (024) 360 95 66



HASKONING

Ingenieurs- en
Architectenbureau



INRICHTING ZUIDELIJKE LEKUITERWAARDEN

Rivierkundig advies inzake nevengeul ontwerpplan Vianen

Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland

Opgesteld : ir. G.J. Akkerman

Gecontroleerd : ir. J.J. Flikweert

Goedgekeurd : ir. G.J. Akkerman

Paraaf:  7-7-00

Paraaf:  7/7/00

Onze referentie : K0451.A0/R001/GJA/ SHE

7 juli 2000

**INHOUDSOPGAVE**

	blz.
1. INLEIDING	1
1.1 Doel van het rapport	1
1.2 Overzicht van de werkzaamheden	1
1.3 Leeswijzer	2
2. HYDRAULISCHE EFFECTEN	3
2.1 Berekeningsresultaten SOBEK-model	3
2.2 Debietverdeling	3
2.3 Stroomsnelheden in de nevengeul	4
2.4 Getij-invloed	6
2.5 Stroomsnelheden bij de in- en uitstroming	7
3. MORFOLOGISCHE EFFECTEN	9
3.1 Aanzanding van de hoofdgeul	9
3.2 Morfologische consequenties nevengeul en in- en uitstroming	10
3.3 Schatting van sedimentatie binnen de uiterwaard voor het vigerende plan	11
4. CONCLUSIES HYDRAULISCHE EN MORFOLOGISCHE CONSEQUENTIES	14
5. OPLOSSINGSRICHTING VERBETERINGEN ONTWERP	16
BIJLAGE A	
A.1 Gebruikte gegevens bij de modelopbouw in SOBEK	
A.2 Modelschematisatie	
A.3 Calibratie	
A.4 Toegepaste randvoorwaarden	

1. INLEIDING

1.1 Doel van het rapport

Het voorliggend rapport betreft rivierkundig advies aangaande hydraulische en morfologische aspecten van de zuidelijke Lekuitwaarden bij Vianen, HASKONING-projectnummer K0451.A0. Het gaat daarbij om een meestromende nevengeul die thans wordt ontworpen in het kader van het project Inrichting Zuidelijke Lekuitwaarden.

Deze werkzaamheden zijn uitgevoerd onder de Raamovereenkomst Rivierkundige Assistentie (ON981), naar aanleiding van de offerte-aanvraag van RWS Directie Oost-Nederland d.d. 25 mei 2000 van de heer ing. N.H. Huntelaar en overeenkomstig de offerte van HASKONING van 23 mei 2000 met kenmerk K0451.A0/B003/GJA/TBA.

In 1999 zijn in het kader van een MER-studie door WL/Delft Hydraulics rivierkundige berekeningen (met het IVR-DSS en met WAQUA) voor meerdere varianten van het plan uitgevoerd (Sloff, 1999). Thans wordt het MMA-alternatief verder uitgewerkt (door Arcadis Heidemij Advies) en dit ontwerpplan ligt hier voor ter beoordeling op de rivierkundige effecten.

1.2 Overzicht van de werkzaamheden

De advieswerkzaamheden omvatten het geven van een rivierkundig advies op een aantal punten en het uitvoeren van ondersteunende berekeningen met een speciaal voor dit advies opgezet SOBEK-model. Het advies omvat, conform de offerte-aanvraag het volgende:

- vaststelling van de grootte van het onttrekkingsdebiet van de nevengeul voor een zestal afvoerniveaus;
- vaststelling van de stroomsnelheden in de nevengeul bij deze afvoerniveaus, ook bij de in- en uitstroming vanuit en naar de rivier;
- vaststelling van de variatie in de stroomsnelheden ten gevolge van de getijbeweging;
- te verwachten aanzanding in de hoofdgeul ten gevolge van de onttrekking van het debiet door de nevengeul;
- morfologische consequenties voor de nevengeul: potentiële aanzanding en erosie, werking zandvangen;
- consequenties voor het Merwedekanaal: dwarsstroming en sedimentatie;
- aangeven oplossingsrichtingen indien de nevengeul niet lijkt te voldoen in de zin van ongewenste hydraulische of morfologische consequenties.

Naast de SOBEK-berekeningen voor de zes afvoeren en een vaste benedenrand, is ook een berekening uitgevoerd met getij bij (nagenoeg) dominante afvoer en zijn ook een tweetal gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd, waarbij zowel de ruwheid in de hoofdgeul als die in de nevengeul werden gevarieerd.



Het advies wordt gegeven aan de hand van berekeningen met een speciaal hiertoe opgezet SOBEK-model en op basis van een deskundigenoordeel.

Het advies is uitgevoerd door de volgende personen:

- ir G.J. Akkerman (rivierkundige inbreng, projectleider en rapportage);
- ir. O. Scholl (SOBEK-modellering);
- ir. C. van Haselen (interne advisering en ondersteunende werkzaamheden);
- ir. J.J. Flikweert (interne advisering).

Van de zijde van Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland heeft de heer ing. N.H. Huntelaar de begeleiding verzorgd.

1.3

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de uitkomsten van de SOBEK-berekeningen en de daaruit af te leiden hydraulische effecten. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de morfologische effecten van de nevengeul, zowel voor de hoofdgeul, de nevengeul als het Merwedekanaal. Conclusies aangaande de hydraulische en morfologische effecten zijn in hoofdstuk 4 vermeld. Hoofdstuk 5 gaat in op mogelijke verbeteringsmaatregelen. Een beknopte beschrijving van het SOBEK-model en de calibratie is in de Bijlage A vermeld.

Opgemerkt wordt dat waar in dit rapport wordt gesproken over bovenaanvoer, afvoeren, debieten en dergelijke, deze betrekking hebben op de Nederrijn/Lek (tenzij anders aangegeven).

2. HYDRAULISCHE EFFECTEN

2.1 Berekeningsresultaten SOBEK-model

Het SOBEK-model is beknopt beschreven in de bijgaande Bijlage.

De zes onderzochte afvoerniveaus van de bovenaanvoer Nederrijn/Lek zijn als volgt (met tussen haakjes de afvoer van de Bovenrijn bij Lobith):

- 50 m³/s (1532 m³/s)
- 100 m³/s (1610 m³/s)
- 300 m³/s (1981 m³/s)
- 600 m³/s (3274 m³/s)
- 1175 m³/s (6088 m³/s)
- 1680 m³/s (8705 m³/s)

Verder zijn nog drie berekeningen gemaakt bij een Lek-bovenafvoer van 600 m³/s:

- getijbeweging (gemiddeld getij) aan benedenrand;
- Chezy-ruwheidscoëfficiënt C in hoofdgeul = 30 m^{0,5}/s (extreem ruw) in plaats van C = 45 m^{0,5}/s (standaardwaarde);
- ruwheidswaarde van Nikuradse k_s = 0,3 m in diepste deel nevengeul i.p.v. 0,2 m.

De laatste twee berekeningen zijn bedoeld als gevoeligheidsberekeningen ten aanzien van de bij de overige berekeningen gebruikte standaardwaarden voor de ruwheid in hoofdgeul en nevengeul.

2.2 Debietverdeling

In onderstaande tabel is de met SOBEK berekende debietverdeling weergegeven; hierbij staan vermeld: aanvoerdebiet Lek, debiet door oostelijke nevengeul, door de westelijke nevengeul en door de voorhaven van het Merwedekanaal (positief in de richting van de hoofdgeul).

Type berekening	Debiet Lobith m ³ /s	Aanvoer- debiet Lek m ³ /s	Nevengeul Oostzijde		Nevengeul westzijde		Voorhaven Merwedekanaal	
			Debiet m ³ /s	% van aanvoer	Debiet m ³ /s	% van aanvoer	Debiet m ³ /s	% van aanvoer
Stationair	1532	50	3	5%	0	0%	2	4%
Stationair	1610	100	6	6%	1	1%	5	5%
Stationair	1981	300	23	8%	5	2%	19	6%
Stationair	3274	600	72	12%	17	3%	55	9%
Stationair	6088	1175	255	22%	78	7%	177	15%
Stationair	8705	1680	466	28%	157	9%	309	18%
Getij (minimum)	3274	600	66	11%	14	2%	37	6%
Getij (gemiddeld)	3274	600	72	12%	17	3%	55	9%
Getij (maximum)	3274	600	80	13%	21	4%	74	12%
C hoofdgeul = 30	3274	600	112	19%	25	4%	86	14%
K_s nevengeul = 0,3	3274	600	67	11%	16	3%	51	9%

Tabel 1: debietverdeling

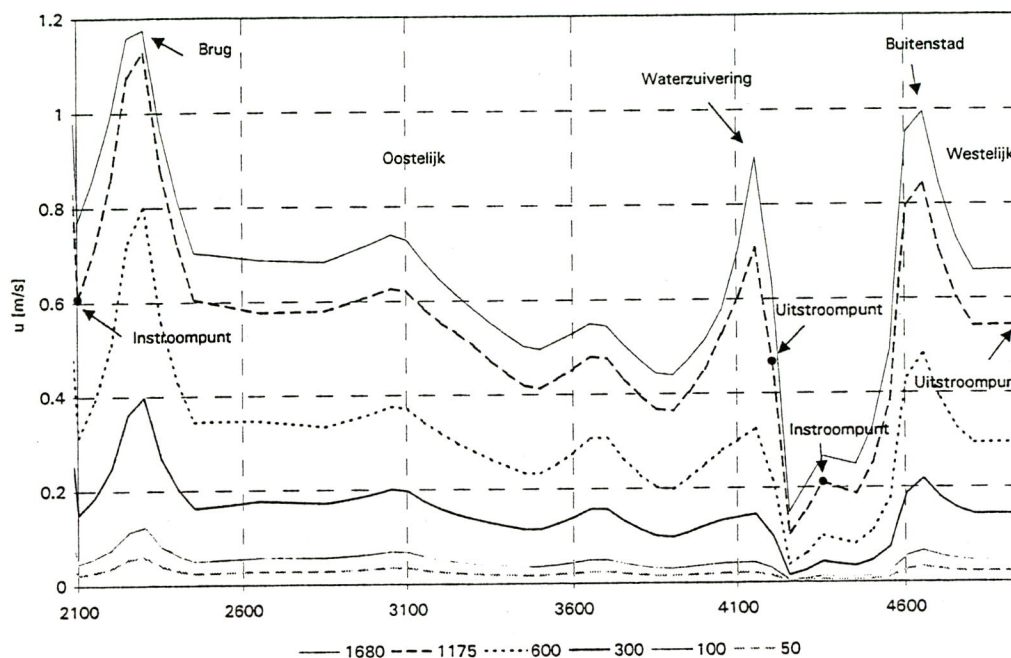
Bij deze resultaten vallen de volgende punten op:

- de oostelijke nevengeul trekt verhoudingsgewijs veel debiet, 8 tot 12 % voor bedvormende afvoercondities voor de hoofdgeul (de bedvormende afvoer ligt tussen 300 en 600 m³/s in; in dit rapport is 600 m³/s aangehouden als standaardwaarde voor de bedvormende afvoer voor de gevoeligheidsberekeningen);
- bij dit afvoerbereik gaat ruim 2/3 via de voorhaven naar de hoofdgeul terug en minder dan 1/3 van het debiet van de oostelijke nevengeul gaat door de westelijke nevengeul;
- als gevolg van de nevengeul gaat er bij 300 m³/s en 600 m³/s respectievelijk 8 en 12 % minder debiet door de hoofdgeul; dit betekent een nagenoeg gelijke procentuele afname van de stroomsnelheid, wat als vrij fors kan worden beschouwd met het oog op mogelijke aanzanding (zie verder Hoofdstuk 3);
- bij een bovenafvoer van 600 m³/s blijkt de getij-invloed klein te zijn in de oostelijke nevengeul (afvoer varieert met circa 10 % rond de gemiddelde waarde) en wat groter in de westelijke nevengeul (afvoer varieert circa 20 % rond de gemiddelde waarde); in de voorhaven van het Merwedekanaal blijft de afvoer gemiddeld even groot (9% van bovenafvoer met variatie tussen 6 en 12 %);
- sterk verruwen van de hoofdgeul ($C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$) geeft een sterke vergroting van de afvoer door de nevengeul: de toename bedraagt ten opzichte van de afvoer bij de standaardruwheid in het zomerbed ($C = 45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$) een kleine 60 %. Deze bandbreedte is als vrij extreem te beschouwen omdat een $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ een extreme ondergrens voor de zomerbedruwheid zal zijn. Hierbij wordt aangetekend dat deze ruwheid niet alleen toegerekend dient te worden aan het zomerbed, maar ook aan de ruwe oevers van de kribvakken en dergelijke, omdat deze laatste
- niet in het SOBEK-model zijn gemodelleerd;
- een ruwer bed van de diepste delen van de nevengeul met $k_s = 0,3 \text{ m}$ i.p.v. $0,2 \text{ m}$ heeft maar een relatief klein effect op het debiet: minder dan 10 % afname in zowel de oostelijke als de westelijke nevengeul ten opzichte van $k_s = 0,2 \text{ m}$.

2.3 Stroomsnelheden in de nevengeul

Vanwege ecologische eisen wordt wel een gewenste stroomsnelheid aangehouden tussen 0,1 m/s en 0,8 m/s. Boven een snelheid van circa 1,5 m/s is bovendien vis-optrek via de geul moeilijk voor minder goed zwemmende vissen. Vaak wordt een nevengeul ook als morfologisch inactief ontworpen, waarbij geen erosie en sedimentatie van het bodemmateriaal optreedt. Voor de vigerende nevengeul betekent dit dat de stroomsnelheden onder de 0,3 m/s zouden moeten blijven omdat de bodem uit zandig materiaal bestaat.

De hierna gepresenteerde stroomsnelheden zijn berekend *in de diepere delen* van de nevengeul (gedeelte dat op NAP- 1 m ligt); de snelheden zijn daar het hoogst en er zal daar geen aaneengesloten vegetatie aanwezig zijn, zodat deze snelheden bepalend zijn voor de morfologische activiteit. Deze stroomsnelheden zijn voor de zes afvoeren aangegeven in figuur 1.



Figuur 1: Stroomsnelheden in de oostelijke nevengeul (links) en westelijke nevengeul (rechts) voor de zes afvoerniveaus (stationair en met standaardwaarden voor de ruwheid)

De x-as in deze figuur is arbitrair (gekoppeld aan de SOBEK-schematisatie); het begin van de nevengeul begint links in de figuur op $x = 2200$. Daarbij is geen rekening gehouden met de lokaal aanwezige zandvang; deze heeft namelijk geen invloed op de debietonttrekking naar de nevengeul. Verder diende bij de schematisatie van de dwarsprofiel in SOBEK het in- en uitlaatprofiel van de drempel op NAP- 1 m te worden gemodelleerd en de dwarsprofielen door de zandvang liggen daar te kort bij. De stroomsnelheden ter plaatse van de zandvang zijn daarom handmatig berekend uit de stroomsnelheden bij de inlaat en de verhouding in stroomoppervlakken. De in Figuur 1 aangegeven stroomsnelheden dienen bij de zandvangen dus nog te worden gereduceerd.

Op circa 150 m vanaf het instroompunt van de oostelijke nevengeul is er een snelheidtoename, als gevolg van de aldaar aanwezige vernauwing (mogelijk locatie voor brug). Een andere piek in het snelheidsverloop treedt op aan de benedenstroomse zijde nabij de uitstroming, veroorzaakt door de waterzuiveringsinstallatie en de uitstulping van de nat grasland- en moerasvegetatie- zones.

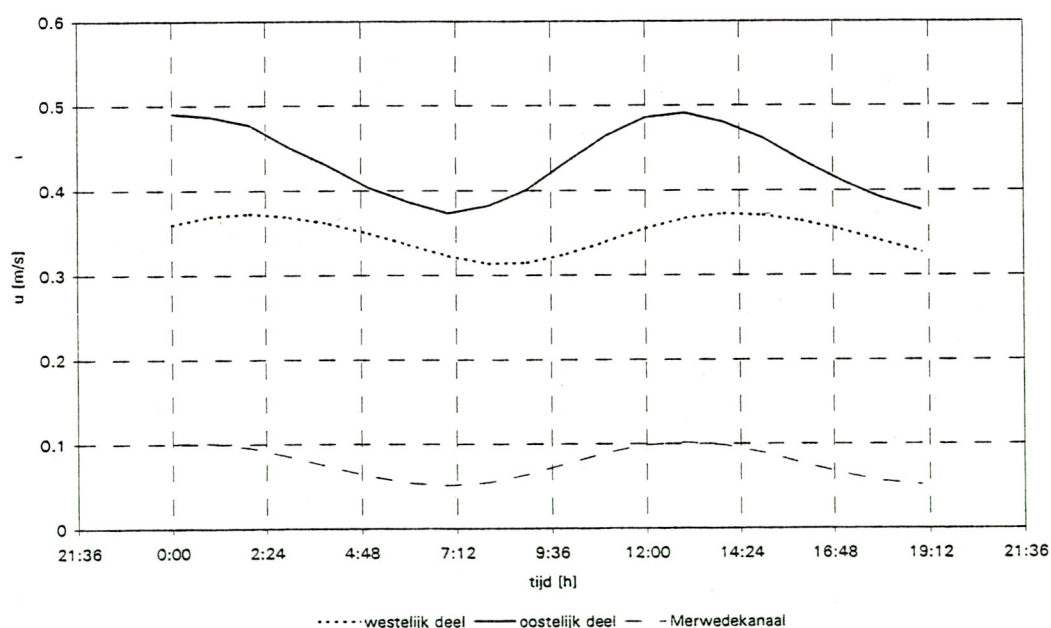
Ondanks het aanzienlijk kleinere debiet, zijn de stroomsnelheden in het westelijke deel (in de figuur van circa $x = 4300$ tot bijna 5000 m) van een zelf-

de orde van grootte als die in het oostelijke deel. Dit duidt erop dat de natte profielen van de westelijke nevengeul ook kleiner zijn. Ook treedt in deze tak, ongeveer halverwege, als gevolg van verdere profielvernaauwing een piek in de stroomsnelheid op.

De grootte van de stroomsnelheden is dusdanig laag dat dit geen beletsel behoeft te vormen voor het opzwellen van vis (grenssnelheid 1,5 tot 2,0 m/s). Wel is er morfologische activiteit te verwachten in beide delen van de nevengeul, omdat bij 600 m³/s en hoger, de stroomsnelheid boven 0,3 m/s ligt. Deze laatste kan grofweg worden beschouwd als de kritieke stroomsnelheid in de diepere delen van de nevengeul waarbij het bodemmateriaal in beweging komt (daarbij is aangehouden dat er matig fijn tot matig grof zand in deze geulen aanwezig is). Deze toch nog relatief lage stroomsnelheden zijn opvallend ten opzichte van het relatief grote onttrekkingsdebiet (12 % bij 600 m³/s); dit komt door het relatief zeer ruime profiel van de nevengeul.

2.4 Getij-invloed

De invloed van de getijbeweging (bij een afvoer van 600 m³/s) op de stroomsnelheid in de diepste delen van de nevengeul zal niet erg groot zijn, gezien de relatief beperkte invloed op het debiet door de nevengeul. Dit is te zien in onderstaande figuur.



Figuur 2: Variatie stroomsnelheden in de oostelijke nevengeul, de westelijke nevengeul en in de voorhaven van het Merwedekanaal bij gemiddeld getij en Lek-bovenafvoer van 600 m³/s.

Bij lagere bovenafvoeren zal de modulatie op de stroomsnelheid groter worden, maar de gemiddelde stroomsnelheid neemt af met de kleinere bovenafvoer; per saldo zullen de absolute maximumsnelheden naar verwachting lager zijn.

Als gevolg van onnauwkeurigheden in de modellering van het SOBEK model zou de stroomsnelheid kunnen zijn onderschat. Een indicatie van de grootte van deze onnauwkeurigheden volgt uit de berekening met $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ voor de hoofdgeul. Er gaat dan aanzienlijk meer water door de nevengeul, waardoor de snelheden in de nevengeul bij een bovenafvoer van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ toenemen met circa 50 %. De verwachting is dat de werkelijke toename aanzienlijk kleiner is, omdat $C = 30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ een zeer lage waarde is.

Door verhoging in de ruwheid in de diepe delen van de nevengeul zal het debiet en de stroomsnelheid afnemen. Het debiet bleek minder dan 10 % af te nemen; de afname in stroomsnelheid in de nevengeul blijkt ook van die orde te zijn.

2.5 Stroomsnelheden bij de in- en uitstroming

De zandvang is in SOBEK niet gemodelleerd, omdat deze (nagenoeg) geen invloed heeft op het onttrekkingsdebiet, zoals eerder aangegeven. Het doorstroomoppervlak neemt bij de zandvang (op NAP- 2 m) en een waterstand op NAP+ 2 m met circa 1/5 toe, derhalve zullen de stroomsnelheden met circa 1/5 afnemen. Bij lagere afvoeren is er wellicht een relatief grotere afname van de snelheden maar de sedimentvracht neemt dan ook sterk af doordat minder debiet wordt ingenomen.

De stroomsnelheid bij de in- en uitstroming van zowel de oostelijke als de westelijke tak wordt vanzelfsprekend bepaald door het debiet door beide takken.

Bij de instroming van de oostelijke nevengeul komt het doorstroomprofiel redelijk overeen met het gemiddelde van de overige profielen in de bovenstroomse helft van de oostelijke nevengeul. De instroomsnelheid is daarmee ook qua orde van grootte gelijk aan de oostelijke helft.

Bij de uitstroming van de oostelijke nevengeul is bij hogere afvoeren sprake van een sterke vernauwing in de nevengeul (zie Figuur 1); wel is net bovenstrooms van de uitstroming in de voorhaven van het Merwedekanaal een verbreding en verdieping in de vorm van een zandvang geprojecteerd. Overigens is ook deze zandvang om dezelfde reden niet in SOBEK gemodelleerd. De stroomsnelheden zijn bij de uitstroming lager dan in de vernauwing bovenstrooms. Bij een afvoer van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ is deze snelheid circa 0,25 m/s. Bij een hogere afvoer, bijvoorbeeld $1175 \text{ m}^3/\text{s}$, bedraagt de stroomsnelheid echter al het dubbele! Bij deze laatste afvoer worden de leikanden van de voorhaven in de huidige situatie nog (lang) niet overstroomd en ondervindt het scheepvaartverkeer dus nog geen hinder van dwarsstroming. De dwarsstroomsnelheid in de voorhaven zal weinig kleiner zijn dan de snelheid van de stroming die uit de nevengeul komt. Dit komt doordat er

sprake is van een brede vlakke straalstroming, die weinig mogelijkheid heeft zich over korte afstand horizontaal te spreiden. Wel zal er reductie van de stroomsnelheid optreden als gevolg van verticale spreiding. Daar staat tegenover dat de berekende stroomsnelheden bij de uitlaat *profielgemiddelde* stroomsnelheden zijn; in het midden van de uitlaat zullen de snelheden hoger zijn als gevolg van meer geconcentreerde stroming. Globaal kunnen beide effecten tegen elkaar worden weggestreept.

De dwarsstroomsnelheden komen daarmee bij hogere afvoeren (zoals bij 1175 m³/s, waarbij thans nog goed kan worden gevaren) naar verwachting ruim boven de toegestane dwarsstroomsnelheid van 0,30 m/s uit, wat als niet toelaatbaar voor de scheepvaart kan worden beschouwd.

Er dient ook rekening te worden gehouden met de langssnelheid in de voorhaven van het Merwedekanaal, vanwege de toestroming naar de hoofdgeul. Deze langsstroomsnelheden zijn echter, vanwege het ruime profiel van de voorhaven relatief laag: bij een afvoer van 600 m³/s bedraagt deze (over het profiel gemiddeld) circa 0,1 m/s, bij 1175 m³/s circa 0,3 m/s en bij 1680 m³/s circa 0,4 m/s. Deze snelheden zijn aanzienlijk hoger (circa factor 2) dan eerder berekend met het IVR-DSS model door Sloff (1999). Gezien de detaillering van het hier toegepaste SOBEK-model ten opzichte van het IVR-DSS model, mag worden aangenomen dat de hier berekende waarden betrouwbaarder zullen zijn.

Bij de instroming van de westelijke nevengeul zijn de snelheden relatief laag, omdat daar sprake is van een relatief ruim profiel en een aanzienlijk lager debiet dan bij de oostelijke tak (circa 1/3 van de oostelijke tak). Dit geeft instroomsnelheden in de orde van eveneens 1/3 van de uitstroomsnelheden van de oostelijke nevengeul in de voorhaven.

Bij de uitstroming van de westelijke nevengeul in de hoofdgeul zijn de stroomsnelheden qua orde van grootte gelijk aan die bij de instroming van de oostelijke nevengeul: circa 0,15 m/s bij een bovenafvoer van 300 m³/s, circa 0,30 m/s bij 600 m³/s, circa 0,45 m/s bij 1175 m³/s en circa 0,60 m/s bij 1680 m³/s.

3. MORFOLOGISCHE EFFECTEN

Uit de debietverdeling lijkt als belangrijkste conclusie naar voren te komen dat de oostelijke nevengeul teveel debiet onttrekt.

Consequenties van een (te) grote debietinname kunnen zijn:

- teveel aanzanding in de hoofdgeul;
- te sterke dwarsstroming in de voorhaven van het Merwedekanaal;
- te hoge stroomsnelheden in de nevengeul;
- te grote morfologische activiteit;
- inefficiëntie van de zandvangen.

3.1 Aanzanding van de hoofdgeul

In verband met aanzanding van de hoofdgeul wordt doorgaans een waarde van 4 tot 5 % (extra) onttrekkingsdebiet door de nevengeul als acceptabel geacht. Dit blijkt bijvoorbeeld ook uit de nevengeul bij Gameren: daarbij werd berekend (Van de Kreeke, 1996) dat bij 4% onttrekking 20 cm aanzanding zou optreden en bij 9% onttrekking 35 cm aanzanding.

Het gaat echter niet alleen om het *totale* debiet dat wordt onttrokken, maar vooral ook om de *toename* van de debietonttrekking ten opzichte van de huidige situatie. Deze toename is voor MHW af te leiden uit WAQUA –berekeningen van Sloff (1999), figuren 2 en 5. Daaruit blijkt dat bij MHW circa 8 % meer water door de heringerichte uiterwaard (MMA-variant) gaat. Het verschil is echter bij lagere afvoeren veel groter: thans stroomt de uiterwaard door de aanwezige zomerkade weinig mee (pas vanaf een bovenafvoer in de Lek van ruim 2000 m³/s). In de nieuwe situatie gaat bij afvoeren onder die waarde al een aanzienlijk deel van het aanvoerdebiet door de nevengeul: geschat kan worden rond de 30 %; dit betekent ook een grote stroomsnelheidsafname in de hoofdgeul. Ondanks dat door de uiterwaardinrichting bij MHW dus “slechts” 8 % extra wordt onttrokken, lijkt eventuele aanzanding van de hoofdgeul dus aanzienlijk meer te kunnen zijn dan volgens de vuistregel.

Zo lijkt voor Vianen bij bedvormende afvoer (afvoer op de Lek tussen 300 en 600 m³/s) met een onttrekkingspercentage tussen respectievelijk 8% en 12% een aanzanding van tenminste 40 cm, maar waarschijnlijk circa 50 cm of meer.

De IVR-DSS berekeningen door Sloff (1999) geven aan dat een aanzanding van slechts 20 tot 30 cm zou optreden. Gezien de ervaring bij het ontwerp van Gameren en de voorliggende overwegingen en de hier uitgevoerde SO-BEK-berekeningen lijkt een hogere waarde aannemelijk. Strikt genomen is er op het zomerbedtraject bij Vianen waar de herinrichting plaatsvindt (circa kmr 947 tot 951) geen belemmering voor de scheepvaart bij een dergelijke grotere aanzanding. Enerzijds is er echter het huidige beleid om de aanzanding in de hoofdgeul te beperken tot 20 cm. Ook zijn er andere redenen die

een beperking van de aanzanding rechtvaardigen, zoals beperking van de zandgolven die in de loop van de tijd vanuit het aanzandingsgebied naar benedenstrooms toe lopen (waar lokaal wel scheepvaartrestricties zijn).

Uit het oogpunt van beperking van de te verwachten aanzanding van de hoofdgeul wordt hier derhalve aanbevolen het onttrekkingsdebiet met ruim de helft te beperken bij een afvoer van 600 m³/s.

3.2 Morfologische consequenties nevengeul en in- en uitstroming

Morfologische processen

De nevengeul kan sedimentatie ondervinden van fijne sedimentfracties (silt en slib) die met het onttrokken water worden meegevoerd. Bij hogere stroomsnelheden kan dit sediment juist niet bezinken terwijl het aanwezige bodemmateriaal kan worden getransporteerd, waardoor lokaal erosie en sedimentatie van bodemmateriaal ontstaat.

Bij een middelfijn tot middelgrof zandige bodem in de nevengeul zal vanaf circa 0,3 m/s sedimenttransport beginnen. Uit figuur 1 blijkt dat bij de hogere afvoeren (al vanaf circa 600 m³/s) er bij het vigerende ontwerp sprake is van stroomsnelheden die deze waarde overschrijden. Het gevolg is dat er sediment naar benedenstrooms wordt getransporteerd en mogelijk ook zijdelings naar de "lobben" van de nevengeul; beide effecten lijken niet erg gewenst met het oog op sedimentatie van de voorhaven van het Merwedekanaal als ook verzanding van delen van de nevengeul. Het gevaar voor doorgaande uitschuring van de nevengeul lijkt anderzijds niet groot, omdat de aansluiting niet aan de benedenstroomse zijde van de buitenbocht van de Lek is gesitueerd.

Een ander aspect is de ongelijkmatigheid van de stroomsnelheidsverdeling in langsrichting van de nevengeul (zie figuur 1). De "pieken" in de stroomsnelheid worden bij hogere afvoeren meer geprononceerd. Dit betekent dan ook dat aldaar lokaal erosie is te verwachten; dit zal zich vooral uiten in verdieping van de nevengeul in de nauwere doorsneden totdat een zeker evenwicht wordt bereikt en de stroomsnelheidspieken zijn verdwenen. Ook is verbreding van de geul mogelijk, maar dit is afhankelijk van de mate waarin zich langs de oevers stroomresistente vegetatie ontwikkelt. Gesteld kan dus worden dat de snelheidspieken na enige morfologische activiteit zullen afvlakken als gevolg van profielaanpassingen.

De stroomsnelheid vanaf welke het ingenomen slib en silt totaal niet meer sedimenteert is circa 0,6 m/s, wat kan worden afgeleid van een kritische schuifspanning vanaf circa 1,5 N/m². Bij lagere waarden zal ook een deel al niet meer sedimenteren. Eerder is door Schropp (1994) hiervoor een stroomsnelheid van 0,30 m aangehouden. Minimum stroomsnelheden van een dergelijke orde *in de gehele nevengeul* komen alleen voor tijdens hogere afvoeren. Bij lagere afvoeren zal er dus altijd sprake zijn van een (gedeeltelijk) sedimentatieproces van het slib. Bij dit sedimentatieproces moeten de

wisselende stromingsomstandigheden en de invloed van het getij in aanmerking worden genomen.

In de huidige situatie is sprake van een hooggelegen uiterwaard. Bij het juist overstroomd ervan is sprake van een hoge vangst-efficiëntie van het slib, maar de slibvracht is minder groot dan bij nog hogere afvoeren (waarbij de efficiëntie overigens wel minder is). Van deze tegenwerkende effecten wint de hogere slibvracht het en er zal *per tijdseenheid* bij hogere afvoeren dus meer sedimenteren. Hogere afvoeren komen echter minder vaak voor, zodat voor het afvoerregiem van de rivier toch bij de lagere afvoeren de meeste sedimentatie optreedt. Bij Vianen ligt de huidige uiterwaard zo hoog dat deze gemiddeld 0,2 dag per jaar overstroomt; de huidige sedimentatie is daarmee gering. Na uitvoering van het herinrichtingsplan is sprake van lange inundatieduren en zal sedimentatie wel een belangrijk aspect worden. Dit wordt ook bevestigd door eerdere sedimentatiestudies (met rekenmodellen) voor meestromende nevengeulen langs de Waal, waaruit blijkt dat sterke sedimentatie kan worden verwacht.

3.3 Schatting van sedimentatie binnen de uiterwaard voor het vigerende plan

De volgende toetsingscriteria moeten worden genoemd:

- de nevengeul mag niet dichtslibben;
- de voorhaven mag niet dichtslibben.

Dit kan worden bevorderd door:

- beperking instroom sediment door vormgeving inlaat (maar is ongunstig voor hoofdgeul);
- sediment dat tóch binnenkomt in de zandvang concentreren;
- de slibfractie zo mogelijk door laten spoelen;
- erosie benedenstrooms van zandvang voorkomen door lage stroomsnelheid ($< 0,3$ m/s).

Voor de Stifische Waard langs de Waal is het sedimentatieproces uitgebreid onderzocht. Er is echter nogal wat verschil met de Zuidelijke Lekuiterwaarden bij Vianen: zo heeft de Waal grotere zwevend-stofconcentraties: 30 mg/l tegenover 10 mg/l voor de Lek bij Lek-afvoeren onder circa 400 m³/s blijkens metingen van Rijkswaterstaat, zoals vermeld in Sloff (1999). Dit wordt veroorzaakt doordat op de Nederrijn/Lek veel sediment bezinkt bij de stuwen. Het projectgebied bevindt zich echter benedenstrooms van de stuw bij Hagestein en er is sprake van getijwerking. Getijwerking zal als gevolg van opstuwing, en daardoor stroomverlamming, sedimentatie in de nevengeul kunnen versterken.

Er volgen nu drie nadere beschouwingen:

1. Schatting van de potentiële maximale slibafzetting.
2. Schatting van de mate waarin de zandvangen zullen voldoen.
3. Sedimentatie in de voorhaven van het Merwedekanaal.

Ad 1. Schatting van de potentiële maximale slibafzetting

Globaal is de gemiddelde jaarafvoer van de Nederrijn/Lek $310 \text{ m}^3/\text{s} * 365 * 24 * 3600 = \text{circa } 10 * 10^9 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Circa 8% daarvan gaat naar de nevengeul, waardoor er circa $8 * 10^8 \text{ m}^3$ water per jaar door de nevengeul stroomt. Als de sedimentconcentratie gemiddeld circa 10 mg/l bedraagt (metingen RWS) en wordt aangenomen dat deze concentratie ook naar de nevengeul wordt meegevoerd dan is de maximale slibafzetting: $8 * 10^8 * 0,01 \text{ kg} = 8 * 10^6 \text{ kg}$. Bij een sedimentair gewicht van 1200 kg/m^3 betekent dit een maximale sedimentatie in 1 jaar van een kleine 7.000 m^3 . Bij een sedimentvang met een afmeting van circa 10.000 m^2 betekent dit een sedimentdikte van bijna $0,7 \text{ m/jaar}$.

In werkelijkheid zal niet alle sediment tot bezinking komen. Toch lijkt een forse sedimentatie waarschijnlijk.

Sediment dat niet in de nevengeul tot bezinking komt, kan neerslaan in de voorhaven van het Merwedekanaal. Het doorsluizen van fijn sediment, bijvoorbeeld door het handhaven van een minimale stroomsnelheid van $0,3 \text{ m/s}$ in de nevengeul is voor de voorhaven ongunstig.

Het voorgaande geeft aan dat reductie van het ontrekkingsdebiet met meer dan een factor 2 ook wenselijk is om de sedimentinname naar de nevengeul, en daarmee de sedimentatie, te beperken en om sedimentatie van de voorhaven in voldoende mate te beperken.

Ad 2. Schatting van de mate waarin de zandvangen zullen voldoen

De slibfractie heeft een effectieve valsnelheid van naar verwachting circa $7 * 10^{-5} \text{ m/s}$ (bevinding bij toetsing sedimentatie Stifitse Waard). Bij een lengte van de zandvang van circa 150 m en een bezinkingsdiepte van circa 3 m (dit is voor een waterstand van $\text{NAP} + 2 \text{ m}$ ten opzichte van de benedenstroomse aansluitende bodem van de nevengeul op $\text{NAP} - 1 \text{ m}$) zal dit sediment alleen uit het onderste deel van de verticaal kunnen bezinken.

De valsnelheid w kan voor sediment fijner dan $200 \mu\text{m}$ worden uitgedrukt als :

$$w = 9,0 * 10^5 * D_m^2 \text{ (m/s)}$$

waarin D_m = mediane korreldiameter (m)

Voor de zandvang is bij volledige effectiviteit, gerekend vanaf de waterpiegel, voor verschillende waarden van de stroomsnelheid in de zandvang u_z de volgende minimale waarde van w benodigd:

$u_z = 0,1 \text{ m/s}$	$w = 2,0 * 10^{-3} \text{ (m/s)}$
$u_z = 0,2 \text{ m/s}$	$w = 4,0 * 10^{-3} \text{ (m/s)}$
$u_z = 0,3 \text{ m/s}$	$w = 5,3 * 10^{-3} \text{ (m/s)}$

Table 2: Minimaal benodigde valsnelheden als functie van stroomsnelheid in zandvang



De waarden van w zijn echter voor de fijne slibfracties veel lager. Slechts de grove slib/siltfractie tussen 25 en 60 μm komt in de buurt van de benodigde valsnelheid bij een stroomsnelheid in de nevengeul van 0,1 m/s.

In werkelijkheid zal (behalve bij de hogere afvoeren) de getijwerking sedimentatie bevorderen. Ook zal vegetatie sedimentatie versterken; dit is vooral van belang voor de nevengeul als geheel, maar ter plaatse van de sedimentvang is waarschijnlijk (tenzij specifiek aangebracht) weinig vegetatie aanwezig.

De stroomsnelheden zijn ter hoogte van de sedimentvang lager dan berekend volgens SOBEK: het profiel bij een onge vulde sedimentvang op NAP-2 m is circa 20% ruimer (bij een waterstand van NAP+ 2 m), dus de stroomsnelheden zijn circa 20% lager.

Uit bovenstaande komt ook de wenselijkheid naar voren om het onttrekkingsdebiet te verminderen. Dit heeft een positief effect op zowel de stroomsnelheid als op de sedimentvracht.

Ad 3. Sedimentatie voorhaven Merwedekanaal

Aanzanding van de voorhaven van het Merwedekanaal kan worden veroorzaakt door fijn slib, maar ook door geërodeerd bodemmateriaal vanuit de nevengeul. Dit laatste dient sowieso zoveel mogelijk te worden voorkomen; hiertoe is de sedimentvang aan het benedenstroomse eind van de nevengeul nuttig. Zo lang de stroomsnelheid ter plaatse minder dan 0,3 m/s bedraagt zal nauwelijks bodemmateriaal in de voorhaven terechtkomen. Door de profielverwijding in deze sedimentvang (bijna 30% bij een waterstand van NAP+ 2 m), is hieraan voldaan tot een afvoer van naar schatting circa 1000 m³/s.

Het fijn slib dat vanuit de nevengeul de voorhaven inkomt zal de neiging hebben naar de rivier te worden verplaatst door de aanwezige riviergerichte stroming. Wel kan enige sedimentatie ontstaan door de lage stroomsnelheden (onder 0,1 m/s in de voorhaven bij een bovenafvoer van 600 m³/s).

Gezien de grote potentiële slibvracht die kan bezinken als de sedimentvangen van de nevengeul niet goed werken, is aandacht voor het goed werken van deze sedimentvangen nodig en lijkt ook verkleining van de slibvracht (door afname van het debiet) wenselijk. Bij het beter functioneren van de zandvangen moet worden gedacht aan verdieping van de zandvangen ten opzichte van het vigerende ontwerp.



4.

CONCLUSIES HYDRAULISCHE EN MORFOLOGISCHE CONSEQUENTIES

Het voorliggende ontwerp voor de inrichting van de Zuidelijke Lekuiterswaarden is een ecologisch attractief ontwerp. De rivierkundig minder gunstige effecten waar RWS Directie Oost-Nederland voor beducht is, worden na de hier uitgevoerde analyse in grote lijn bevestigd.

- Het meest saillant hydraulische aspect van de nevengeul volgens het vigerend ontwerp is dat de debietonttrekking relatief zeer groot is voor afvoeren van een grootte waarbij in de huidige situatie de uiterwaard nog niet wordt overspoeld (de onttrekking loopt daarbij op tot circa 30 %). Het is dan ook aannemelijk dat er een grote aanzanding in de hoofdgeul zal ontstaan, waarbij eerder aan circa 0,5 m of meer moet worden gedacht dan aan de maximaal toegelaten 0,2 m. Dit houdt in dat het onttrekkingsdebiet met ruim de helft dient te worden gereduceerd.
- De sedimentvangen in de oostelijke nevengeul vervullen een belangrijke rol om sterke sedimentatie in de voorhaven van het Merwedekanaal te voorkomen en om de nevengeul zelf niet dicht te laten slibben. Daarbij is een lage stroomsnelheid in de zandvang van belang. Ook dient de slibvracht zo klein mogelijk te zijn, m.a.w. het onttrekkingsdebiet dient niet te groot te zijn. De huidige zandvang is aan de ondiepe kant met het oog op de vangst-efficiëntie en de te verwachten hoge frequentie van onderhoudsbaggerwerk. Verdiepen van de zandvang ligt meer voor de hand dan vergroting van het bezinkingsoppervlak doordat dit efficiënter is, minder milieuschade bij het onderhoudsbaggerwerk zal geven en minder ruimtebeslag geeft. Bij een lager onttrekkingsdebiet en een verdiepte zandvang zal de sedimentvangst veel groter zijn dan in het vigerend ontwerp; bij een aangepast ontwerp van de nevengeul en zandvangen zal een verdere kwantificering van de efficiëntie van de zandvangen mede richting dienen te geven aan de benodigde aanpassingen.
- In het Merwedekanaal is voor het vigerende plan een sterke aanzanding te verwachten, zeker nadat de vigerende zandvangen zijn opgevuld. Als het onttrekkingsdebiet met meer dan de helft wordt verminderd en de zandvangen beter zijn gedimensioneerd, wordt de situatie voor de voorhaven veel gunstiger; dit dient dan nog nader te worden gekwantificeerd (afhankelijk van de werkelijke debietreductie en van de dimensies van de zandvangen).
- Het is van belang dat de nevengeul niet morfologisch actief is, in de zin van sterke erosie en sedimentatie van het bodemmateriaal langs de thalweg van de nevengeul (waar zandig materiaal voor komt). Dit vraagt om stroomsnelheden onder 0,3 m/s bij bedvormende afvoer, maar liefst nog lager omdat dan ook bij hogere afvoeren geen morfologische activiteit optreedt. Daarbij wordt opgemerkt dat vanuit het ecologisch goed functioneren van de nevengeul een stroomsnelheid gewenst is van tussen 0,1 m/s en 0,8 m/s. De ondergrens van 0,1 m/s wordt hier alleen al gehaald door de getijbeweging bij lage afvoer. De stroomsnelheden in de nevengeul zijn thans groter dan 0,3 m/s bij veelvoorkomende afvoeren;

ook hiervoor geldt dat een reductie van het onttrekkingsdebiet met een factor van meer dan 2 gewenst is.

- De stroomsnelheid bij de *instroming van de oostelijke nevengeul* is bij benadering gelijk aan de stroomsnelheid over een groot deel van de oostelijke nevengeul zelf.
- De stroomsnelheid bij de *uitstroming van de oostelijke nevengeul* is eveneens van dezelfde orde als die over een groot deel van de oostelijke nevengeul; dit betekent dat bij een afvoer van $1175 \text{ m}^3/\text{s}$ een (profiel-gemiddelde) stroomsnelheid van circa $0,5 \text{ m/s}$ optreedt.
- De dwarsstroomsnelheid in de voorhaven zal, samenhangend met het vorige punt, mogelijk al bij afvoeren vanaf $600 \text{ m}^3/\text{s}$, maar zeker vanaf $1175 \text{ m}^3/\text{s}$ groter zijn dan toelaatbaar. Een reductie van een factor van ruim 2 voor de dwarsstroomsnelheid als gevolg van reductie van het onttrekkingsdebiet is ook hiervoor nodig.
- De stroomsnelheid bij de *instroming van de westelijke nevengeul* is aanzienlijk lager: ruim twee maal lager dan die bij de oostelijke geul.
- De stroomsnelheid bij de *uitstroming van de westelijke nevengeul* in de rivier ligt in de orde van de uitstroomsnelheid van de oostelijke nevengeul.

5. OPLOSSINGSRICHTING VERBETERINGEN ONTWERP

Voorgesteld wordt om het vigerende plan op een dusdanige wijze anders in te richten dat bij een bovenafvoer op de Lek van 600 m³/s de debietonttrekking van circa 12% wordt gereduceerd met meer dan de helft, bij voorkeur met circa 2/3.

Dit heeft positieve gevolgen voor alle hiervoor genoemde punten. Ook kan worden gedacht aan het verdiepen van de zandvangen, maar daar wordt (op zijn best) alleen de sedimentatieproblematiek in de nevengeul mee opgelost.

Bij regulering van de afvoer kan aan de volgende principes worden gedacht:

1. Regulering door beïnvloeding van verhang, hydraulische straal en ruwheid in de nevengeul.
2. Regulering door (al dan niet lokale) profielverkleining

Ad 1.

Van de eerste categorie is alleen verandering van de hydraulische straal en de ruwheid relevant.

Verkleining van de hydraulische straal komt bij een breed profiel neer op verkleining van de waterdiepte. Dit betekent voor de nevengeul een verhoging van het bodemniveau; bij een forse stijging zal de nevengeul dan echter niet meer volledig meestromend zijn. Referentie hiervoor is de extreme ebwaterstand die enkele malen per jaar voor komt en deze ligt op NAP-0,60 m. Voor het permanent meestromen kan de bodem praktisch gesproken worden verhoogd van NAP- 1,50 m tot een niveau van circa NAP- 1,00 m. Een dergelijke verhoging zal echter onvoldoende reductie van het onttrekkingsdebiet geven. Voor het in voldoende mate reduceren van het onttrekkingsdebiet moet veeleer gedacht aan een bodemniveau van tussen NAP+ 1 m en; daarbij is de nevengeul echter niet meer permanent meestromend.

Verandering van de ruwheid treedt op natuurlijke wijze op door vegetatieontwikkeling in de nevengeul en heringerichte aangrenzende uiterwaardgedelten. Vegetatie heeft veel invloed op de afvoercapaciteit van de nevengeul. Dit blijkt bijvoorbeeld wel uit onderstaand staatje (afgeleid van Ven te Chow, 1959). Daarin is voor een slecht onderhouden en begroeide (lees natuurlijke) waterloop de Manning-waarde vermeld; ook is daarbij de Chézy-waarde voor een waterdiepte van 2 m en 4 m berekend en bijgeschreven.

Slecht begroeide waterloop	Manning n	C bij diepte 2 m	C bij diepte 4 m
Dichte begroeiing met waterplanten	0,080	14	16
Oeverplanten en onbegroeide bodem	0,070/0,050	16 /23	18 /25

Tabel 3: Ruwheidswaarden bij sterk begroeide waterloop

Ter vergelijking hiervan: bij een onbegroeide waterloop en enige beddingvormen (zandbodem) is de ruwheidswaarde k_s (equivalente ruwheid volgens Nikuradse) te stellen op ongeveer 0,20 m. Daarbij is C bij een diepte van 2 m: $37 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ en bij een diepte van 4 m: $43 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. De stroomsnelheid is lineair evenredig met C (volgens de Chézy-vergelijking) dus een verkleining van C met een factor 2 betekent ook een verkleining van de stroomsnelheid met een factor 2.

Opgemerkt wordt dat in het SOBEK-model de volgende ruwheden zijn toegepast bij de berekeningen (uitgezonderd de berekening waarbij de ruwheid is gevarieerd):

- in de waterloop onder NAP + 1 m ($k_s = 0,2 \text{ m}$);
- van NAP + 1 m tot NAP + 2 m (hoog-dynamisch moeras en pioniervegetatie): $k_s = 1,00 \text{ m}$;
- boven NAP + 2 m (vochtig en nat grasland): $k_s = 0,40 \text{ m}$.

Bij de berekeningen is dus wel van volgroeide vegetatie uitgegaan voor zover deze zich boven gemiddeld waterpeil bevindt, maar is het diepere deel van de nevengeul onbegroeid verondersteld. Als deze dicht zou begroeien is nog een aanzienlijke reductie van het onttrekkingsdebiet mogelijk ten opzichte van het berekende debiet.

Anderzijds is er direct na aanleg sprake van een (nog) groter onttrekkingsdebiet dan door SOBEK berekend.

Ad 2.

Profielverkleining zal vanzelfsprekend een directe afname van het onttrekkingsdebiet geven. Daarbij legt het uitgangspunt dat de nevengeul meestromend moet zijn een beperking op aan de verticale vernauwing (zie hiervoor). Het merendeel van de reductie zal dus moeten komen van profielversmalling. Als deze versmalling zeer lokaal wordt toegepast, bijvoorbeeld alleen bij de inlaat, dan is het effect hiervan niet groot, tenzij de versmalling zeer sterk is.

Dit laatste zou kunnen worden gerealiseerd door de zomerkade bij de inlaat over een veel kleiner stuk te verlagen; dit is echter niet wenselijk vanwege het nadelig effect op de beoogde MHW-verlaging. Ook zullen sterk vernauwde profielen op andere plaatsen in de nevengeul een te grote onbedoelde afname van de MHW-verlaging geven.

Profielversmalling dient bij voorkeur over een groter deel van de nevengeul moeten plaats te vinden, wil het voldoende effectief zijn. Wel kan profielversmalling bijvoorbeeld meer aan de bovenstroomse zijde van de nevengeul worden geconcentreerd, zodat er een groot profiel overblijft aan de benedenstroomse zijde, waardoor daar bij lage rivierafvoer door de getijwerking een goede dynamiek gehandhaafd blijft. Het verdient aanbeveling de versmalling vooral in de diepere delen te concentreren, zodat bij de minder hoge afvoeren deze vernauwing effectief is en bij zeer hoge afvoeren deze vernauwing relatief minder effect heeft (gecombineerd effect van oppervlak en ruwheidseffect); hiermee kan het nadelig effect op de MHW-verlaging beperkt blijven.



Een belangrijke vermindering van het onttrekkingsdebiet voor de uiteindelijke situatie kan wellicht het beste worden gerealiseerd door een combinatie van maatregelen: verhoogde ruwheid en profielvernaauwing (vooral versmalling) in het bovenstroomse deel van de nevengeul, eventueel gecombineerd met het in geringe mate verhogen van de bodem (tot NAP- 1 m).

Ook moet aandacht worden gegeven aan het overbruggen van de groeiperiode van de vegetatie.

Een oplossing voor zowel de fase direct na gereedkomen als voor de eindsituatie, kan mogelijk worden gevonden door naast profielvernaauwing, "beheersbare" extra ruwheid aan te brengen. Daarbij is te denken aan het "verruwen" van de bodem met kleihopen en aan het toepassen van (deels) tijdelijke beplanting (bijvoorbeeld rietvelden). Ook kan aan een combinatie van beide worden gedacht. De beheersbaarheid zit in het, tijdens de ontwikkeling van de vegetatie, gefaseerd wegnemen van klei en/of beplanting.

Het heeft ons inziens de voorkeur in eerste instantie een dergelijk uitgekend "ecologisch" ontwerp na te streven, alvorens meer civieltechnische oplossingen in beschouwing te nemen, zoals een regelbare inlaat, met breuksteen verdedigde vernauwingen en dergelijke.

Referenties

Arcadis Heidemij Advies (n.n.v.): Ontwerpplan inrichting Uiterwaarden Vianen en de Pontswaard,
Concept (gedeeltelijk verschenen 1 mei), 110403/HN0/39K/000451.002

Kreeke, P.W. van de (1996): Ontwerp nevengeul Gameren, Natuurontwikkelingsproject Gamerensche Waarden,
HASKONING, D1462.A0.

Schropp, M.H.I. (1994): Een ontwerp voor een nevengeul in de Stifte Waard,
RIZA , notanr. 94.061.

Sloff, C.J. (1999): Inrichting Zuidelijke Lekuiterswaarden: Rivierkundige berekeningen
WL/Delft Hydraulics, Q2471.

Ven te Chow (1959): Open Channel Hydraulics,
McCraw Hill, New York.



BIJLAGE A:

Beknopte Beschrijving van het Sobek-Model

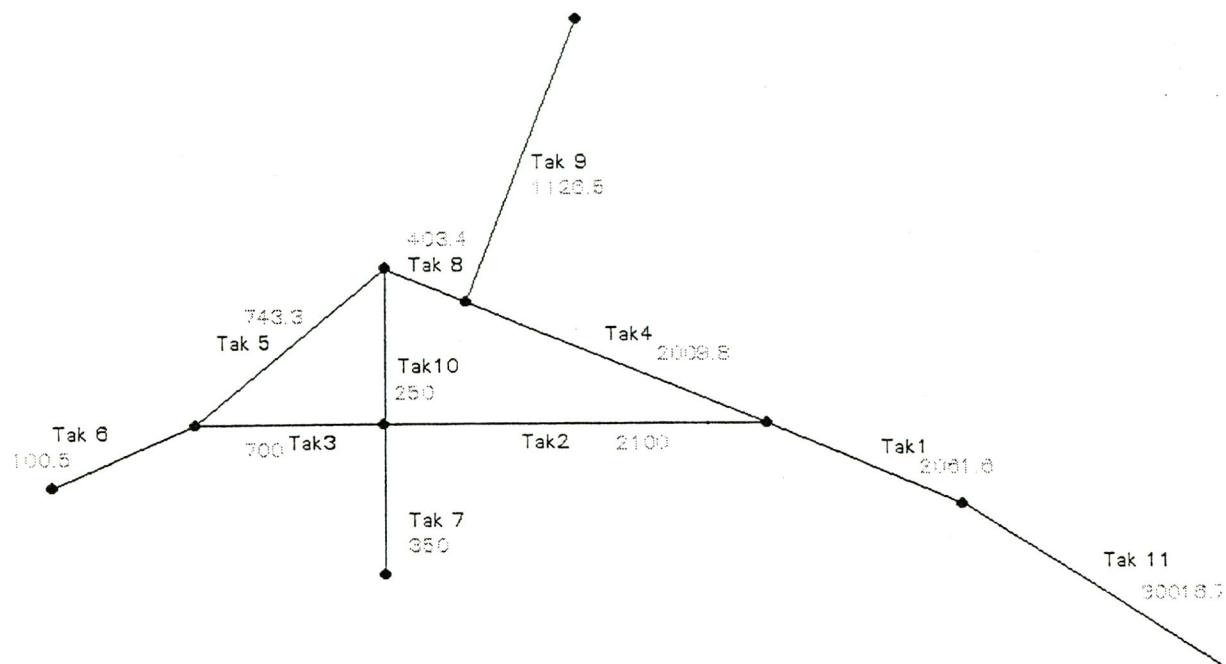
A. 1 Gebruikte gegevens bij de modelopbouw in SOBEK

Uitgangspunt bij de modelopbouw in SOBEK van de situatie bij Vianen is de door ARCADIS gemaakte ontwerptekening van het voorlopig ontwerp voor de herinrichting van de Zuidelijke Lekuiterwaarden. Voor de ijking van het model is gebruik gemaakt van het WL/Delft Hydraulics-rapport Q2471 "Inrichting Zuidelijke Lekuiterwaarden: Rivierkundige berekeningen" (Sloff, 1999). Voor de bepaling van de waterstanden in de Lek in het projectgebied is uitgegaan van de gegevens bij Hagestein en Jaarveld uit het tienjarige overzicht 1981-1991. Voor het projectgebied zijn ook eerder door RWS berekende gegevens betreffende gemiddeld hoog- en laagwaterstanden op kenmerkende locaties (instroom en uitstroom nevengeul) als functie van de afvoer gegeven.

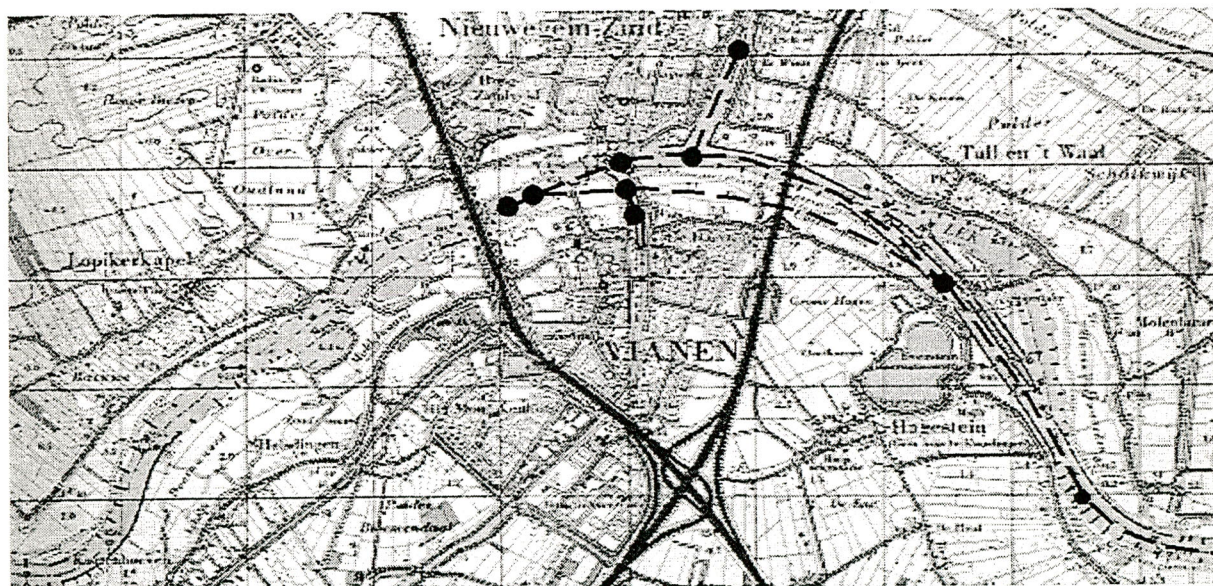
A.2 MODELSCHEMATISATIE

Lay-out van het model

In figuur A.1 is de situatie geschetst. De oostelijke en westelijke nevengeul zijn geschematiseerd als twee aparte takken met lengtes van resp. 2100 m en 700 m, met daartussen het Merwedekanaal tot aan de sluis. Het splitsingspunt bovenstrooms is geplaatst op kmr. 947.4, omdat de ingang van de nevengeul daar op de hoofdgeul aantakt. Direct benedenstrooms van de ingang ligt in de nevengeul een zandvang; deze is echter qua diepte niet meegemodelleerd (ligt op NAP- 2 m i.p.v. NAP-1 m), omdat deze (nagenoeg) geen invloed zal hebben op het onttrekkingsdebiet (de verlaagde kade van de inlaat ligt op NAP- 1 m). De ingang naar het Merwedekanaal is geschematiseerd als een tweetal takken. De langste tak richting de sluis heeft een lengte van 350 m, de tak richting de rivier is 250 m lang. De westelijke nevengeul mondt uit in de rivier bij kmr. 951.15. De benedenstroomse rand van het model is gelegd bij kmr. 951.265. Dit is gedaan omdat daar de benedenstroomse randvoorwaarde (waterstand) goed bekend is. De rivier is geschematiseerd met 6 takken, met een bovenstroomse rand op 32 km van het splitsingspunt. Dit is gedaan om de hydraulische respons ter plaatse van het splitsingspunt goed in het model te krijgen wanneer de getijrandvoorwaarde benedenstrooms wordt opgelegd. De totale geschematiseerde rivierlengte bedraagt 35.3 km. Het Lekkanaal is opgenomen tot aan de Prinses Beatrixsluis. De lengte van het stuk Lekkanaal bedraagt 1126 m.



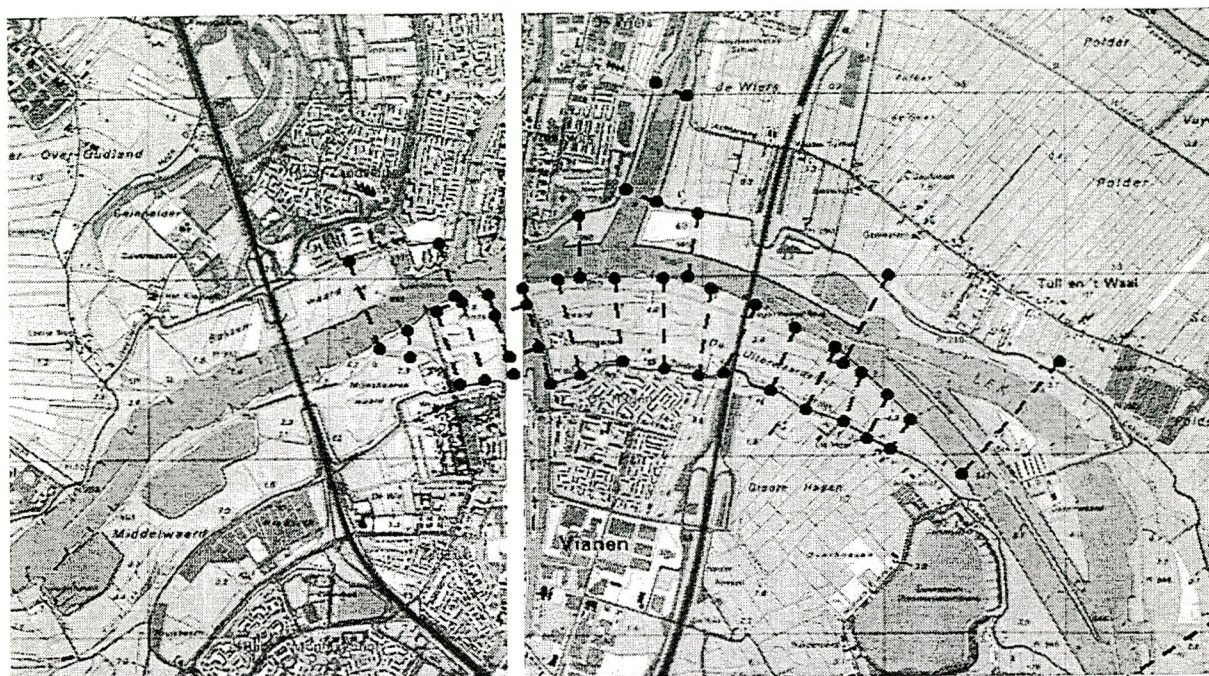
Figuur A.1 Schematisatie met taknummers in SOBEK



Figuur A. Overzicht modelgebied

Dwarsprofielen

In figuur A.3 is weergegeven waar de dwarsprofielen zijn gesitueerd in de schematisatie.



Figuur A.3 Dwarsprofielen van het SOBEK-model

De uiterwaard is geschematiseerd aan de hand van 22 dwarsprofielen die gemiddeld 190 meter van elkaar verwijderd zijn. De rivier is geschematiseerd met vijf verschillende dwarsprofielen, waarbij een aantal 'representatieve' dwarsprofielen is herhaald op plaatsen waar het werkelijke profiel ongeveer overeenkomt. Geheel bovenstrooms in de langste tak van ruim 32 km is een representatief dwarsprofiel herhaald. Alleen de langste tak is onder een verhang van ongeveer $2 \cdot 10^{-5}$ ingebracht. Het meest bovenstroomse punt ligt circa 3,20 m hoger dan het splitsingspunt. Dwarsprofielen in de uiterwaard zijn gemaakt aan de hand van het ontwerpplan Vianen. Voor de rivier zijn de dwarsprofielen verkregen uit de WAQUA-schematisatie van WL|Delft Hydraulics. De drie kanaaltakken zijn in het model geschematiseerd als bakprofiel.

A.3 Calibratie

Calibratie hoofdgeul

Ten behoeve van de zes in te stellen afvoerniveaus waren de gemiddeld hoog- en laagwaterstanden bekend (RWS berekeningsgegevens). De gemiddelde waterstand was echter niet aangegeven. Deze zijn herleid uit de waterstandsgegevens uit het tienjarig overzicht 1981-1991 bij Hagestein en Jaarveld. Daaruit was een factor te herleiden die de positie van de gemiddelde waterstand tussen HW en LW aangeeft. Deze factor is ongeveer 0.45, d.w.z. de gemiddelde waterstand ligt op 45% van het verschil tussen HW en LW (t.o.v LW). Aan de hand van deze factor zijn de gemiddeld optredende waterstanden bij zowel de benedenstroomse rand van het SOBEKmodel als bij het splitsingspunt bepaald. Deze calibratiegegevens gelden echter alleen voor de huidige situatie. Hiervan was geen SOBEK-model gemaakt. Derhalve

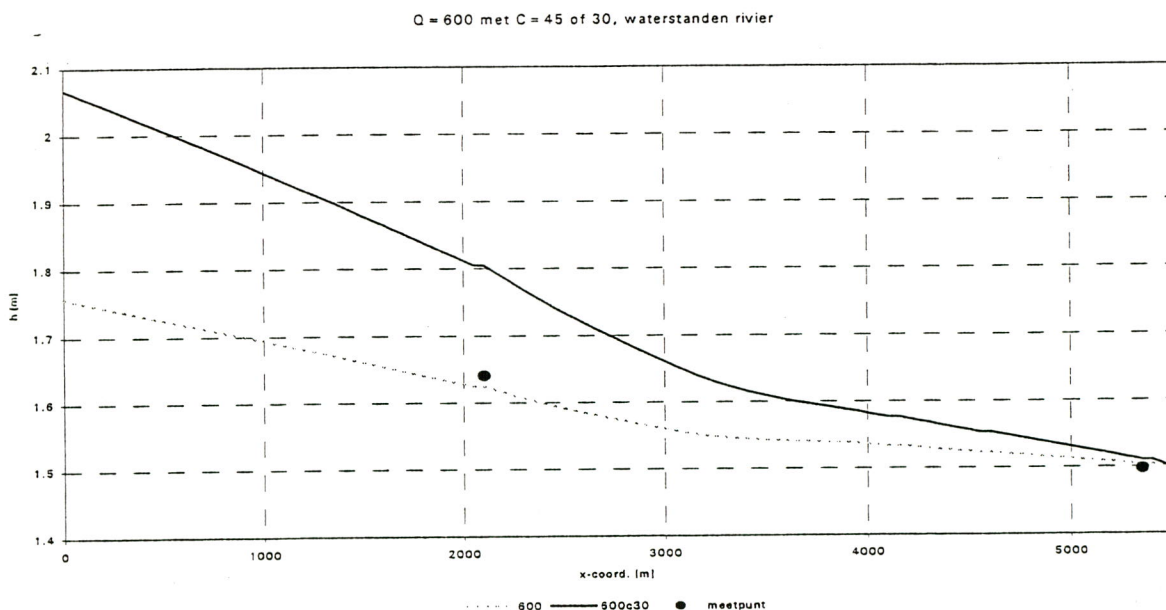
is een vereenvoudigd SOBEK-model gemaakt waarbij de uiterwaard in het geheel niet meestroomt (dit is thans het geval voor nagenoeg alle afvoeren, behoudens een afvoer die 0,5 dag per jaar voorkomt). Deze calibratie kan dus als calibratie van de hoofdgeul (zomerbed) in het SOBEK-model worden gezien.

Door aan de benedenstroomse rand de waterhoogte t.o.v. NAP op te leggen en aan de bovenstroomse rand een constant debiet is gekeken in hoeverre de waterstanden bij het splitsingspunt redelijkerwijs overeenkomen met de gegevens. In tabel A.1 staan de waterstanden waarop het model gecalibreerd is.

QNR	WATERSTAND BIJ KMR. 947.415	WATERSTAND BIJ KMR. 951.265
0 [m ³ /s]	0.41 [m]	0.41 [m]
50 [m ³ /s]	0.48 [m]	0.45 [m]
100 [m ³ /s]	0.55 [m]	0.52 [m]
300 [m ³ /s]	0.92 [m]	0.86 [m]
600 [m ³ /s]	1.64 [m]	1.50 [m]
1175 [m ³ /s]	3.17 [m]	2.85 [m]
1680 [m ³ /s]	4.30 [m]	3.95 [m]

Tabel A.1 Waterstanden bij verschillende debieten

Figuur A.4 toont de door SOBEK berekende waterstand bij een afvoer van 600 m³/s (deze is als standaard-afvoer aangehouden, overeenkomende met bedvormende afvoer voor de hoofdgeul). De ruwheid in de rivier wordt gegeven door een Chézy-coëfficiënt C van 45 m^{0.5}/s. Het resultaat van een hogere ruwheid met C = 30 m^{0.5}/s staat ook aangegeven.



Figuur A.4 Waterstanden bij $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ in het model vs. gemeten waterstanden bij een Chézy-coëfficiënt in de geul van resp. $45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ en $30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$

Hieruit werd geconcludeerd dat de hoofdgeul voldoende goed reproduceert. De ruwheid in de hoofdgeul is kennelijk een gevoelige parameter. Met een C-waarde van $45 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ wordt een goed resultaat verkregen. Bij de gevoeligheidsberekeningen voor het SOBEK-model met de nevengeul is ook een C-waarde van $30 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ aangehouden om het effect daarvan op de stroming in de nevengeul te zien.

Calibratie SOBEK-model met nevengeul

Van het SOBEK-model met nevengeul is de afvoerverdeling over de hoofdgeul en de verlaagde uiterwaard met nevengeul vergeleken met de afvoerverdeling zoals die door WAQUA is berekend (zoals gegeven in het rapport van Sloff, 1999, figuur 8). Uit het WAQUA-model blijkt 30 tot 40% van het aanvoerdebiet via de uiterwaard te gaan bij MHW. Dit is bij het SOBEK-model bij MHW 31%. Dit is als goed beoordeeld; dat WAQUA iets meer afvoer door de nevengeul voorspelt is bovendien goed mogelijk doordat het profiel in WAQUA iets aan de ruime kant is geschematiseerd.

A.4 Toegepaste randvoorwaarden

Bij de stationaire berekeningen met de zes afvoeren is steeds een vaste benedenrand aangehouden, alsmede de debietrand aan de bovenstroomse zijde van het model. Dit geldt ook voor de gevoeligheidsberekeningen waarbij de ruwheid van de hoofdgeul en van de nevengeul zijn gevarieerd.

Bij de getijberekeningen is uitgegaan van de gemiddeld hoogwater- en laagwater gegevens zoals die door RWS zijn toegeleverd op de benedenrand. Daarbij is de getijkromme verondersteld sinusvormig te zijn en is gegeven door:

$$h_a(t) = \frac{1}{2} (HW_a - LW_a) \left\{ 1 + \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right\}$$

De periode T van het getij is gesteld op 12 uur en 20 minuten.