

Voorspellen afvoer nevengeulen



Definitief

Waterdienst

Februari 2010

Voorspellen afvoer nevengeulen

Dossier: C9849.01.001
registratienummer : WA-RK20100018
versie : definitief

Waterdienst

Februari 2010

INHOUD**BLAD**

1	INLEIDING	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Aanpak	4
2	WATERSTANDEN	6
2.1	Waterstanden bij de in- en uitstroom openingen	6
2.2	Drempelhoogte	7
2.3	Meestroomfrequentie	8
2.4	Waterstandvariatie	10
3	METHODIEK BEPALEN AFVOER	13
3.1	Schematisatie	13
3.2	Berekening afvoer geul	15
4	NEVENGEULAFVOER GAMERENSCHER WAARD	16
4.1	Gamerenscher Waard	16
4.1.1	Berekende afvoeren nevengeul	18
5	TOEPASSING OP OVERIGE GEULEN	22
5.1	Klompewaard	22
5.1.1	Berekende afvoer	23
5.2	Vreugderijkerwaard	23
5.2.1	Berekende Afvoer	25
5.3	Bakenhof	26
5.3.1	Berekende Afvoer	27
6	VERWACHTE TOEKOMSTIGE ONTWIKKELING NEVENGEUL	28
6.1	Gevoeligheid parameters	28
6.2	Verwachte toekomstige ontwikkeling	30
7	CONCLUSIES	32

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

Het aanleggen van nevengeulen is een van de maatregelen uit het basispakket van de PKB "Ruimte voor de Rivier". Het uitgangspunt voor de Ruimte voor de Rivier projecten is dat het water meer ruimte gegeven wordt tijdens hoogwater, en op deze manier de waterstand in de rivier verlaagd wordt. De nevengeul draagt hier aan bij door in tijden van hoogwater mee te stromen en zo een deel van de totale afvoer over te nemen.



Figuur 1-1 Nevengeul de Bakenhof tijdens lage afvoer

Rijkswaterstaat start een evaluatie van de reeds aangelegde nevengeulen in de Gamerensche Waard en de Klompenwaard (beiden in de Waal), de Bakenhof (Nederrijn) en de Vreugderijkerwaard (IJssel). Onderdeel hiervan is het bepalen van de relatie tussen de rivierwaterstanden en de nevengeulafvoer voor elk van de genoemde nevengeulen. Dit wordt gedaan in deze studie, waarvoor DHV in december 2009 opdracht van de Waterdienst heeft gekregen.

1.2 Aanpak

Om de relatie tussen de rivierwaterstanden en de nevengeulafvoer voor de Gamerensche Waard, de Klompenwaard, de Bakenhof en de Vreugderijkerwaard te bepalen heeft Rijkswaterstaat informatie beschikbaar gesteld. Deze informatie bestaat met name uit:

- eigenschappen van de geulen,
- eigenschappen van de reguleringswerken (constructies, afmetingen ed.) en
- rivierwaterstanden (Sobek berekeningen)
- nevengeulafvoermetingen voor Gamerensche Waard

Op basis van deze informatie en eenvoudige formuleringen voor afvoeren zal een relatie tussen de rivierwaterstand en de nevengeulafvoer bepaald worden. Dit wordt gedaan in Excel voor een viertal Bovenrijnafvoeren (2000 m³/s, 2300 m³/s, 2650 m³/s en 4000 m³/s). Hiermee wordt een algemeen bruikbare tool opgezet dat ook toepasbaar is voor andere afvoeren.

Voor de nevengeulen van de Gamerensche Waard zijn afvoermetingen beschikbaar waarmee een aantal parameters, o.a. ruwheid, geulbreedte etc afgestemd kan worden. Voor de overige drie geulen zijn geen afvoermetingen beschikbaar en is deze vergelijking dus niet mogelijk, waardoor er een grotere onzekerheid in de resultaten ontstaat.

Met de ontwikkelde methode is het mogelijk om schattingen van effecten van morfologische ontwikkelingen op de geulafvoer te doen. Op basis van gevoeligheden van een aantal parameters (bodemhoogte geul, drempelhoogte en ruwheid) is enig inzicht verkregen in de invloed van veranderingen in de nevengeul op de afvoerrelatie. Om uitspraken te doen over toekomstige ontwikkelingen van de nevengeulen en de daarmee gepaarde verandering van de afvoerrelaties is meer informatie nodig met betrekking tot bodemontwikkeling van de geulen. Deze informatie was niet beschikbaar voor deze studie.

Behalve de nevengeulafvoer is Rijkswaterstaat ook geïnteresseerd in de frequentie van meestromen van de nevengeulen. Op basis van een analyse van rivierwaterstandsmetingen is informatie verkregen over het aantal dagen dat de verschillende geulen hebben meegestroomd. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen zomer en winterperiode.

Opgemerkt moet worden dat er slechts beperkte informatie beschikbaar is. Het merendeel van de gebruikte afmetingen voor de berekeningen is gebaseerd op informatie uit luchtfoto's, waardoor enige onzekerheid in de resultaten ontstaat.

2 WATERSTANDEN

De waterstand in de rivier is bepalend voor het stroombeeld rond de geul en wordt als leidend beschouwd om vast te stellen of de geul alleen een bergende- of ook een stroomvoerende functie heeft. In het geval van het laatste wordt in Hoofdstuk 3 een relatie afgeleid tussen de afvoer door de geul en de rivierwaterstand. In dit hoofdstuk wordt met gebruik van waterstanden die berekend zijn met Sobek een relatie gelegd tussen de drempelhoogte en de Bovenrijnafvoer, en daarmee wordt de meestroom frequentie van geul in kaart gebracht.

2.1 Waterstanden bij de in- en uitstroom openingen

Voor het bepalen van de rivierwaterstand bij de in- en uitstroom openingen van de nevengeulen wordt gebruik gemaakt van met Sobek¹ berekende waterstanden. Deze waterstanden zijn gegeven voor locaties met een onderlinge afstand van ongeveer 500 m en tijdens verschillende Bovenrijnafvoeren. Om de waterstanden op de in- en uitstroom locaties te bepalen tijdens afvoeren van 2000 m³/s, 2300 m³/s, 2650 m³/s en 4000 m³/s, is gebruik gemaakt van lineaire interpolatie. De locaties van de in- en uitlaten zijn gebaseerd op de rivierkilometers zoals weergegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Waterstanden van de in- en uitlaat locaties bij vaste Bovenrijnafvoeren

		Bovenrijnafvoeren [m³/s]			
	<i>rivierkm</i>	2000	2300	2650	4000
Klompewaard		Waterstand [m +NAP]			
Instroomlocatie	869	8,68	9,09	9,57	11,41
Uitstroomlocatie	870	8,60	9,01	9,48	11,32
Gameren		Waterstand [m +NAP]			
Instroomlocatie Grote geul	936,74	1,77	2,04	2,35	3,67
Instroomlocatie Oost geul	936,98	1,75	2,02	2,33	3,64
Uitstroomlocatie Oost geul	937,4	1,72	1,98	2,29	3,58
Instroomlocatie West geul	937,4	1,72	1,98	2,29	3,58
Uitstroomlocatie West geul	938,17	1,67	1,92	2,21	3,48
Uitstroomlocatie Grote geul	938,37	1,65	1,90	2,19	3,46
Bakenhof		Waterstand [m +NAP]			
Instroomlocatie	880,58	8,10	8,30	8,53	10,07
Uitstroomlocatie	882	8,03	8,17	8,36	9,86
Vreugderijkerwaard		Waterstand [m +NAP]			
Instroomlocatie	982,03	0,26	0,36	0,48	1,15
Uitstroomlocatie	984,05	0,17	0,26	0,37	0,99

¹ Deze SOBEK berekeningen zijn uitgevoerd door de Waterdienst; in deze studie zijn de aangeleverde resultaten van deze berekeningen gebruikt.

2.2 Drempelhoogte

De drempelhoogtes bij de in- en uitstroomlocaties van de geulen bepalen bij welke waterstand de geul stroomvoerend wordt. Op het moment dat de waterstand bij zowel de in- als uitlaatconstructie de drempelhoogte overschrijdt, is er namelijk sprake van een stroomvoerende geul. Bij een waterstand die hoger is dan slechts één van de drempels heeft de geul enkel bergend vermogen en wordt er geen water afgevoerd.

Met de beschikbare waterstandgegevens is voor elke geul m.b.v. lineaire interpolatie vastgesteld tijdens welke Bovenrijnafvoer de rivierwaterstand gelijk is aan de drempelhoogte. Deze Bovenrijnafvoer is vervolgens als 'kritieke' afvoer bepalend voor het meestromen van de geul.

De resultaten worden getoond in Tabel 2-2. Een vrije in- of uitstroomopening heeft geen drempel, en de (lokale) geuleigenschappen (zoals doorstroomprofiel en wrijving) zijn dan de enige beperkende parameters voor de stroming. De drempels in de Vreugderijkerwaard zijn altijd verdronken en deze geul is daarom altijd meestromend.

Tabel 2-2: Drempelhoogte en kritieke afvoer van de geulen

	Klompewaard	rieverkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'97	Instroomlocatie	869	12,0	4513
'97	Uitstroomlocatie	870	Vrije uitstroom	
	Gameren, Oost geul	rieverkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'96	Instroomlocatie	936,98	2,04	2328
'96	Uitstroomlocatie	937,4	Vrije uitstroom	
	Gameren, Grote geul	rieverkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'99	Instroomlocatie	936,74	Vrije instroom	1036
'99	Regelwerk Grote geul	937,4	0,88	
'99	Uitstroomlocatie	938,37	Vrije uitstroom	
	Gameren, West geul	rieverkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'96	Instroomlocatie	937,4	0,95	1108
'96	Uitstroomlocatie	938,17	Vrije uitstroom	
	Bakenhof	Rivierkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'03	Instroomlocatie	880,58	6,7 ²	849
'03	Uitstroomlocatie	882	6,7	
	Vreugderijkerwaard	Rivierkm	Drempelhoogte [m +NAP]	Kritieke afvoer [m³/s]
'02	Instroomlocatie	982,03	-1,5	Altijd meestromend
'02	Uitstroomlocatie	984,05	-1,5	

De eerste kolom in bovenstaande tabel toont het jaar van aanleg, waarin ook de drempelhoogtes zijn vastgesteld. Door veranderingen in bodemligging zijn deze drempelhoogtes momenteel mogelijk niet meer

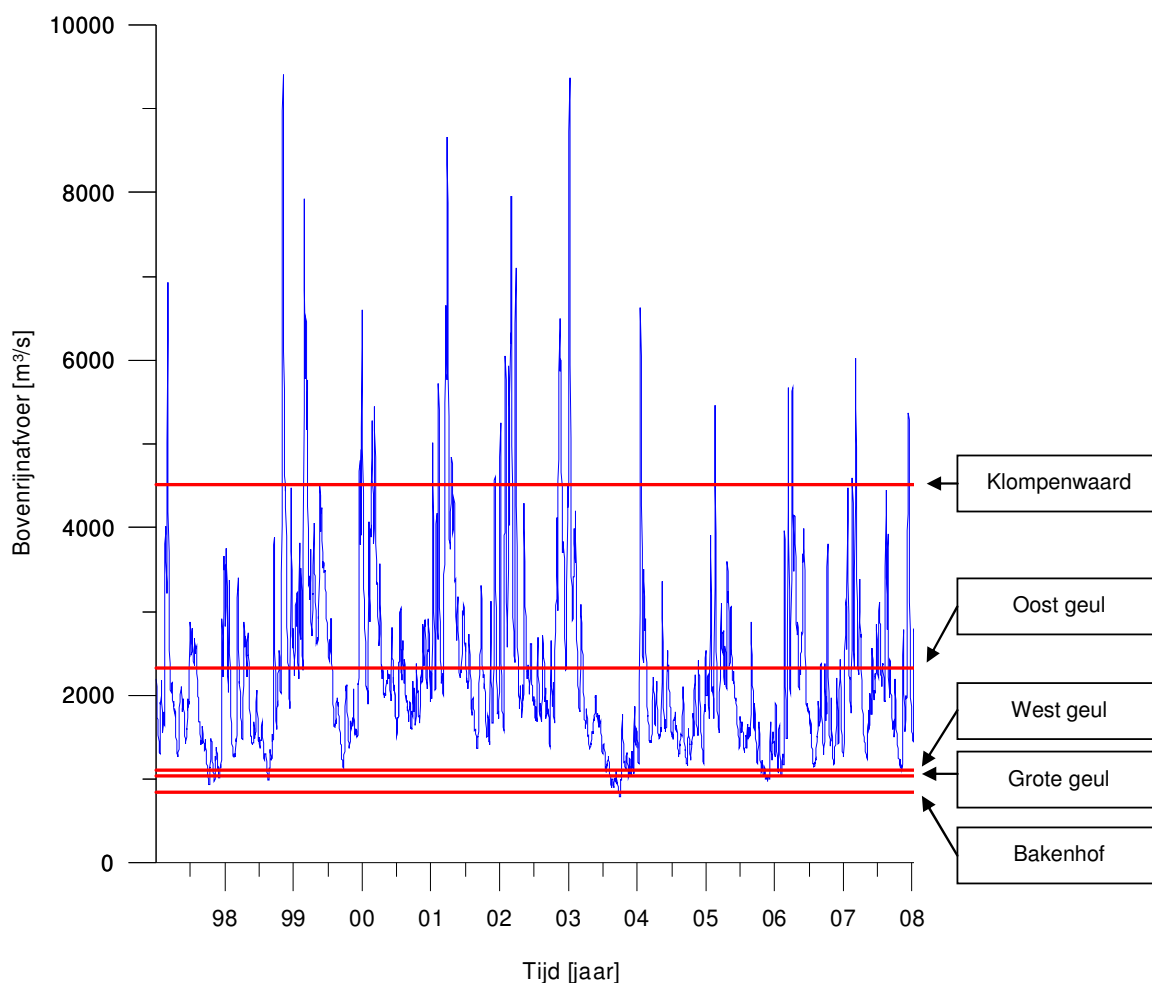
² De exacte hoogte van deze drempel is tijdens dit onderzoek nog niet bekend. Er is aangenomen dat de hoogte gelijk is aan de drempelhoogte bij de uitstroom constructie.

gelijk aan de hier gebruikte waarden. Dit geldt voornamelijk voor de geulen waarin geen constructies zijn geplaatst, d.w.z. de Klompenwaard en de Oost- en West geul bij Gameren. Er is momenteel echter nog geen goed beeld van de bodemontwikkeling in de geulen en/of de actuele drempelhoogtes. Voor het vervolg worden in dit onderzoek dan ook de drempelhoogtes uit Tabel 2-2 aangehouden.

2.3 Meestroomfrequentie

In het geval dat de waterstand hoger is dan de drempelhoogtes wordt de geul stroomvoerend en wordt er dus water door de geul afgevoerd. Aan de hand van de afvoerreeksen van de Bovenrijn (www.waterbase.nl) is met de waarden uit Tabel 2-2 vastgesteld hoeveel dagen, en in welk seizoen, de betreffende geul stroomvoerend is geweest.

In deze analyse is gebruik gemaakt van de afvoermetingen bij Lobith. Deze afvoermetingen geven de dagelijkse Bovenrijnafvoer in m^3/s , en hiermee is bekeken hoe vaak de 'kritieke' afvoer van de geul is overschreden. De afvoermetingen voor de periode 1997 – 2008 worden getoond in Figuur 2-1, met daarin de kritieke afvoeren van de geulen weergegeven als de rode horizontale lijnen.



Figuur 2-1: Afvoermetingen (periode 1997 – 2008) en kritieke afvoeren voor de geulen

In Tabel 2-3 is weergegeven hoeveel dagen per jaar de geul heeft meegestroomd en wat de gemiddelde meestroomfrequentie is in aantal dagen per jaar sinds de aanleg. Hierin is voor de zomerperiode het groeiseizoen langs de rivier aangehouden, d.w.z. 1 mei t/m 31 oktober. De overige maanden worden gerekend tot het winterseizoen. Het paaiseizoen, van belang voor het paaïen en opgroeien van vis, wordt aangenomen als 1 februari t/m 31 juli.

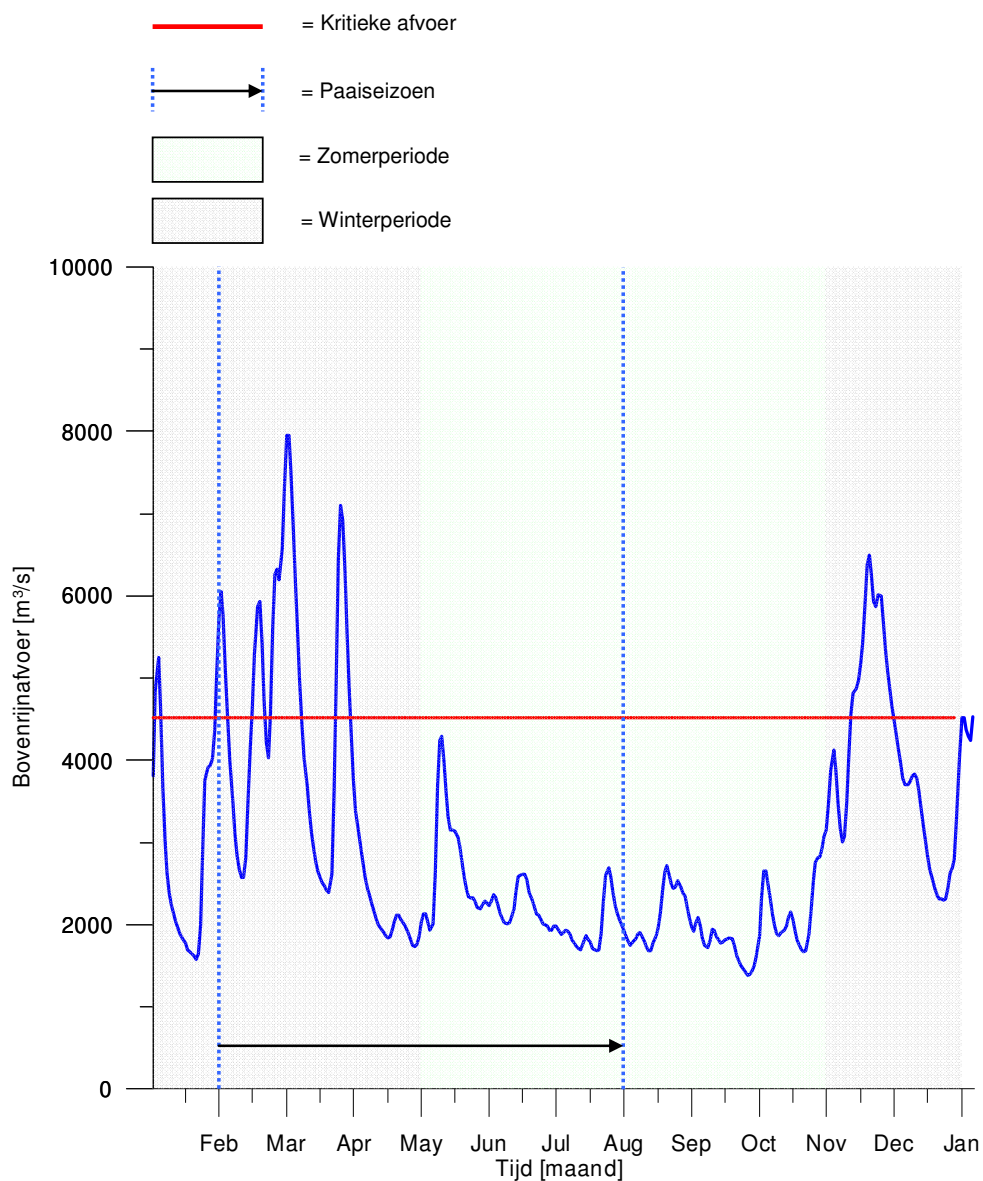
Tabel 2-3: Aantal dagen dat de geul stroomvoerend is, gebaseerd op de rivierafvoer

Kritieke Afvoer	Klompewaard	Gameren			Bakenhof	Vreugderijkerwaard
		Oost geul	Grote geul	West geul		
	4513 m ³ /s	2328 m ³ /s	1036 m ³ /s	1108 m ³ /s	849 m ³ /s	Altijd meestromend
Jaar	Aantal dagen per jaar overschrijding van de 'kritieke' afvoer					
1996*	-	-	-	-	-	-
1997	6	80	-	336	-	-
1998	19	126	-	353	-	-
1999	33	218	-	365	-	-
2000	16	158	366	366	-	-
2001	37	193	365	365	-	-
2002	57	195	365	365	-	365
2003	12	61	307	287	355	365
2004	9	54	366	366	366	366
2005	4	83	344	331	365	365
2006	11	99	364	356	365	365
2007	16	149	365	365	365	365
2008	0	101	365	365	365	365
2009**	0	26	70	70	70	70
Gemiddeld aantal dagen per jaar (na aanleg) overschrijding binnen de periode 1997 t/m 2008						
Jaarlijks	18	129	357	352	364	365
Zomer	0	39	179	177	183	184
Winter	18	90	178	174	181	181
Paaiseizoen	11	81	180	179	180	185

* Omdat in 1996 alleen de oost- en west geul bij Gameren zijn aangelegd (in september en november) wordt dit jaar niet meegenomen in de analyse.

** De waarden van 2009 zijn alleen bekend voor de periode 01-01-2009 tot 11-03-2009 (70 dagen). Deze waarden zijn dan ook niet meegenomen in de (jaar)gemiddelden.

In onderstaande grafiek is de afvoerreeks voor de Klompewaard getoond voor het jaar 2002, waarin de geul 57 dagen meestroomt. De horizontale rode lijn in de grafiek is de kritieke afvoer waarboven de geul gaat meestromen. Uit de grafiek is af te leiden wannéér de geul heeft meegestroomd, in dit geval voornamelijk in de maanden februari, maart en november. Voor de overige locaties en jaren zijn de grafieken in bijlage A toegevoegd.



Figuur 2-2: Afvoermetingen voor het jaar 2002 en de kritieke afvoer voor de Klompenwaard

2.4 Waterstandvariatie

Om een beeld te krijgen van de (seizoensgebonden) variatie van de waterstand in de geul zijn de maximale en minimale afvoeren bij Lobith gebruikt die optreden in de jaren na aanleg. Deze afvoeren zijn met lineaire interpolatie gekoppeld aan met Sobek berekende waterstanden³ om een waterstandvariatie te bepalen. Deze gemiddelde waterstandvariatie is bepaald voor het gehele jaar, voor alleen de wintermaanden en voor alleen de zomermaanden.

³ Deze SOBEK berekeningen zijn uitgevoerd door de Waterdienst; in deze studie zijn de aangeleverde resultaten van deze berekeningen gebruikt.

Als de geul niet meestroomt, maar wel water bergt, is de waterstand in de geul bij benadering gelijk aan de waterstand bij de (vrije) uitstroomopening. In het geval dat de geul wel meestroomt, stroomt het water aan bovenstroomse zijde de geul in en aan benedenstroomse zijde weer terug in de rivier. De waterstand in de geul varieert dan tussen de waterstand bij de uitstroomopening en de waterstand bij de instroomopening, en is afhankelijk van het waterstandverhang in de geul en het verhang over de drempel(s) en/of regelwerken.

In deze analyse is de waterstandvariatie bepaald met de rivierwaterstand ter hoogte van de uitstroom opening. Voor elke geul is aan de hand van de afvoermetingen uit de periode 1997 - 2008 bepaald wat de maximale en minimale opgetreden rivierafvoer is. Deze afvoer bij Lobith is gekoppeld aan de waterstand bij de uitstroom opening van de geul om de maximale en minimale voorgekomen waterstand te bepalen. Het verschil is de maximale waterstandvariatie.

Voor de gemiddelde waterstandvariatie zijn de jaarlijkse- en seizoensgebonden maximale en minimale waterstanden bepaald die zijn opgetreden sinds de aanleg. Het verschil is de jaarlijks gemiddelde waterstandvariatie in de desbetreffende periode en is getoond in onderstaande tabellen.

Tabel 2-4: Waterstandvariaties bij de Klompenwaard

Klommenwaard		
Jaar van aanleg: 1997	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	1998
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9413
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	6,51	14,49
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Jaarlijkse variatie [m]	6,32	
Gem. variatie zomerperiode [m]	3,67	
Gem. variatie winterperiode [m]	6,07	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	5,01	

Tabel 2-5: Waterstandvariaties bij de Oost geul (Gameren)

Oost geul		
Jaar van aanleg: 1996	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	1998
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9413
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	0,64	6,37
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Gem. jaarlijkse variatie [m]	4,46	
Gem. variatie zomerperiode [m]	2,35	
Gem. variatie winterperiode [m]	4,35	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	3,42	

Tabel 2-6: Waterstandvariaties bij de Grote geul (Gameren)

Grote geul		
Jaar van aanleg: 1999	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	2003
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9372
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	0,63	6,30
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Gem. jaarlijkse variatie [m]	4,40	
Gem. variatie zomerperiode [m]	1,54	
Gem. variatie winterperiode [m]	3,09	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	2,47	

Tabel 2-7: Waterstandvariaties bij de West geul (Gameren)

West geul		
Jaar van aanleg: 1996	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	1998
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9413
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	0,64	6,31
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Gem. jaarlijkse variatie [m]	4,41	
Gem. variatie zomerperiode [m]	2,29	
Gem. variatie winterperiode [m]	4,30	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	3,37	

Tabel 2-8: Waterstandvariaties bij de Bakenhof

Bakenhof		
Jaar van aanleg: 2003	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	2003
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9372
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	6,90	12,67
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Gem. jaarlijkse variatie [m]	4,62	
Gem. variatie zomerperiode [m]	0,99	
Gem. variatie winterperiode [m]	2,11	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	1,65	

Tabel 2-9: Waterstandvariaties bij de Vreugderijkerwaard

Vreugderijkerwaard		
Jaar van aanleg: 2002	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Jaar optredende rivierafvoer [-]	2003	2003
Rivierafvoer [m ³ /s]	788	9372
Waterstand bij de uitstroom [m +NAP]	-0,22	2,70
Gemiddelde waterstandvariaties over de jaren sinds de aanleg:		
Gem. jaarlijkse variatie [m]	2,21	
Gem. variatie zomerperiode [m]	0,51	
Gem. variatie winterperiode [m]	1,18	
Gem. variatie Paaiseizoen [m]	0,83	

3 METHODIEK BEPALEN AFVOER

De afvoer door een nevengeul is afhankelijk van een aantal factoren. De eigenschappen van de geul, de reguleringswerken en het totale verval over de geul spelen hier de belangrijkste rol in. Aangezien deze eigenschappen per geul verschillen is er geen algemene relatie voor alle nevengeulen op te stellen. Het is echter wel mogelijk om alle geulen op eenzelfde manier door te rekenen. Hiertoe is een rekenmethode opgezet in Excel waarmee de afvoer door de nevengeul wordt uitgerekend, rekening houdend met de verschillende eigenschappen van de geul.

3.1 Schematisatie

De afvoer door een nevengeul is afhankelijk van:

- De stromingseigenschappen van de geul
- De afvoerreguleringswerken (duiker, overlaat e.d.)
- Het verval per deel van de geul

Om de afvoer door de nevengeul te berekenen wordt de nevengeul geschematiseerd en in drie delen opgesplitst. Deze drie delen zijn:

- *de instroomopening (I)*: bestaande uit bijvoorbeeld een overlaat, duiker of brug;
- *de nevengeul(II)*: hierin is een representatieve dwarsdoorsnede voor de gehele nevengeul aangenomen
- *uitstroomopening(III)*: dit kan een vrije uitstroming, een duiker of een overlaat betreffen.

Naast de stromingseigenschappen van de nevengeul en de afvoerreguleringswerken is de waterstand ter plaatse van de in- en uitstroomopening bekend⁴ (zie hoofdstuk 2). Dit betekent dat het totale verval over de nevengeul als bekend verondersteld kan worden. Aan de hand van deze informatie kan de afvoer door de nevengeul berekend worden.

Voor elk deel zijn eenvoudige formulerings beschikbaar om de afvoer over dat deel te berekenen.

Verhang door geul (Chezy)

$$Q_{geul} = A_{geul} \cdot C_{geul} \sqrt{R \cdot \frac{\Delta h}{L_{geul}}}$$

Met daarin de volgende parameters:

Q_{geul}	debiet door de geul [m ³ /s]
A_{geul}	Oppervlakte geul [m ²]
C_{geul}	Chezy coëfficiënt geul [m ^{1/2} /s]
R	Hydraulische straal geul [m]
Δh	waterstandsverschil over geul [m]
L_{geul}	Lengte geul [m]

In deze formule zijn zowel A_{geul} , C_{geul} en R afhankelijk van de diepte (en dus de waterstand), en variëren hierdoor voor de verschillende Bovenrijnafvoeren.

⁴ Hierbij wordt aangenomen dat de waterstand ter plaatse van de instroomopening gelijk is aan de rivierwaterstand in de rivieras (zoals berekend met Sobek) op dezelfde locatie.

$$C = 18 \log \left(\frac{12R}{k} \right)$$

K Nikuradse ruwheidscoëfficiënt [m]
R hydraulische straal [m]

Om de afvoer over de reguleringswerken te berekenen worden twee verschillende formules gebruikt: de formule voor een duiker en de formule voor een (onvolkomen) overlaat.

Overlaat (onvolkomen)⁵

$$Q_{\text{overlaat}} = m \cdot (h_{\text{benedenstrooms}} - z_{\text{drempel}}) \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

Met daarin de volgende parameters:

Q_{overlaat} debiet over overlaat [m³/s]
m coëfficiënt (0.9 < m < 1.3) [-]
 $h_{\text{benedenstrooms}}$ waterstand benedenstrooms van overlaat [m]
 z_{drempel} hoogte van de drempel tov NAP [m]
 Δh waterstandsverschil over overlaat [m]

Voor de onvolkomen overlaat is de afvoer zowel van de bovenstroomse als van de benedenstroomse waterstand afhankelijk.

Duiker⁶

$$Q_{\text{duiker}} = \mu_{\text{duiker}} \cdot A_{\text{duiker}} \sqrt{2g \Delta h}$$

Met daarin de volgende parameters

Q_{duiker} debiet door duiker [m³/s]
 μ_{duiker} verliescoëfficiënt [-]
 A_{duiker} doorstroomoppervlakte duiker [m²]
 Δh waterstandsverschil over duiker [m]

Het doorstroomoppervlak is afhankelijk van de waterstand. Bij volledig ondergestroomde duiker wordt het volledige doorstroomoppervlak van de duiker benut. Wanneer deze maar gedeeltelijk ondergelopen staat, wordt maar een deel van de duiker gebruikt, en is het doorstroomoppervlak ook kleiner.

⁵ Bron: J. Sieben, geulen in de Gamerensche uiterwaard, 98.032, juni 1998

⁶ Bron: Svasek, Vernieuwing kunstwerkformuleringen in WAQUA, Bvp/1383/6697, 1 december 2006

4 NEVENGEULAFVOER GAMERENSCHEN WAARD

De methode om de geulaafvoer te berekenen is in eerste instantie toegepast op de Gamerensche Waard. De Gamerensche Waard bestaat uit drie nevengeulen waar afvoermetingen van beschikbaar zijn. Hierdoor is een vergelijking mogelijk tussen de berekende nevengeulafvoeren en de werkelijk opgetreden nevengeulafvoeren. Er is slechts beperkte informatie met betrekking tot de geulgeometrie beschikbaar. Het merendeel van de gebruikte afmetingen is gebaseerd op luchtfoto's (google earth). Dit introduceert een onnauwkeurigheid in de resultaten.

4.1 Gamerensche Waard

De eerder beschreven aanpak wordt eerst toegepast om de afvoeren voor de nevengeulen in de Gamerensche waard te bepalen. Voor de afvoeren in de Gamerensche waard zijn metingen beschikbaar, waar de berekende afvoer mee vergeleken kan worden. Hiermee kunnen de parameters in de methode worden gekalibreerd.



Figuur 4-1: Overzicht nevengeulen Gamen (bron: google earth)

De Gamerensche waard bestaat uit drie nevengeulen gelegen langs de Waal, de Grote Geul, Westgeul en Oostgeul. De geulen worden afzonderlijk behandeld.

Grote Geul

De Grote Geul heeft een lengte van ca 1950 m. Na een paar honderd meter waarin de geul door een paar kleine eilandjes opgedeeld wordt, wordt de doorstroomopening beperkt door een bruggetje met drempel (doorstroomopening 15 m, hoogte drempel 88 cm). Stroomafwaarts van de brug neemt de breedte van de geul toe tot ca 80 meter en wordt deze hier en daar gescheiden door (begroeide) zandplaten. De uitstroomopening bestaat uit een vernauwing van de geul.

Eigenschappen inlaatconstructie

Type	Regelwerk (brug)
Hoogte drempel brug	0,88 m +NAP
Breedte drempel brug	10 m
Hoogte weg	4,31 m +NAP
Breedte weg	109,4 m

Dimensies geul:

Lengte geul	1950 m
Breedte geul	60 m
bodem geul	-0,5 m +NAP

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type	Vrije uitstroomopening
------	------------------------

Westgeul

De westgeul is ongeveer 1000 m lang en is aan de bovenstroomse zijde door een drempel van de hoofdgeul gescheiden. Deze drempel heeft een hoogte van 0,95 m +NAP. Naast deze drempel is in de loop van de jaren een geul ontstaan. Een deel van de opening tpv de inlaat is bovendien flink begroeid.

Eigenschappen inlaatconstructie

Type	Overlaat
Drempelhoogte	0,95 m +NAP
Drempelbreedte	40m

Dimensies geul

Lengte geul	700 m
Breedte geul	45 m
bodem geul	-0,5 m +NAP

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type	Vrije uitstroomopening
------	------------------------

Oostgeul

De Oostgeul wordt aan de bovenstroomse zijde van de hoofdgeul gescheiden door een drempel met een hoogte van 2,04 m +NAP. De benedenstroomse zijde van de nevengeul is in de loop der jaren significant aangezand en begroeid.

Eigenschappen inlaatconstructie

Type	Overlaat
Drempelhoogte	2,04 m +NAP
Drempelbreedte	30 m

Dimensies geul (uit google earth)

Lengte geul	465 m
Breedte geul	35 m
bodem geul	-0,5 m +NAP

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type Vrije uitstroomopening

4.1.1 Berekende afvoeren nevengeul

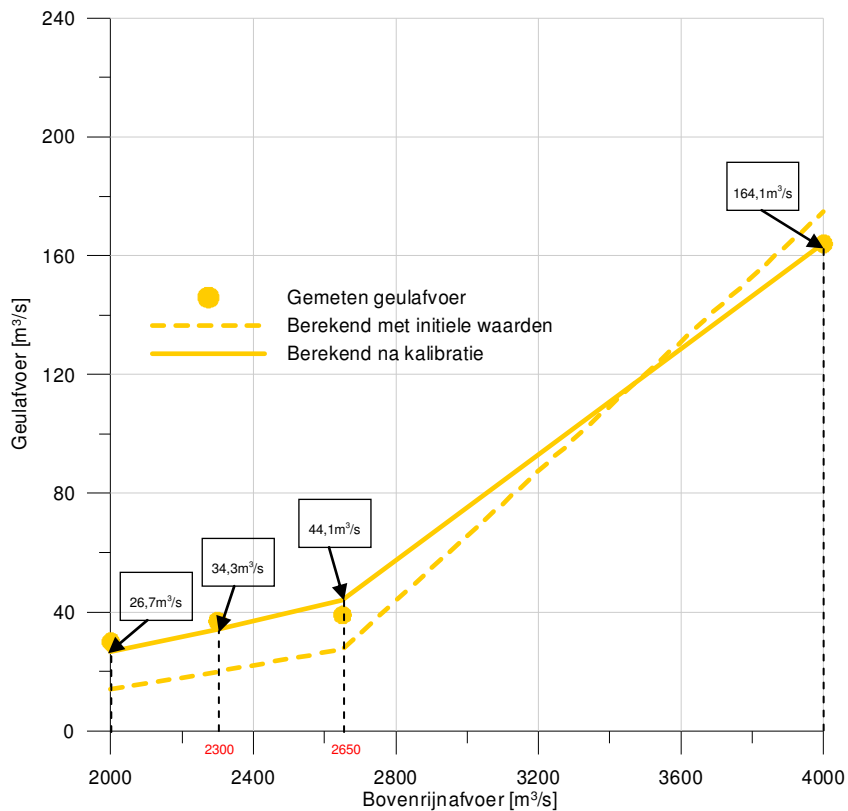
Met de informatie over de geulen, de regelwerken en de waterstanden kan uiteindelijk de afvoer door de geul berekend worden. Deze berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de eerder beschreven methodiek. Hiervoor zijn de drie geulen afzonderlijk geschematiseerd.

Voor de nevengeulen in de Gamerensche Waard zijn metingen beschikbaar. Deze gemeten afvoeren zijn vergeleken met de berekende afvoeren. Om de berekende afvoeren af te regelen om deze met de gemeten waarden overeen te laten komen is er een aantal parameters die veranderd kunnen worden. Zo kan de ruwheid van geul aangepast worden. Daarnaast zijn de afmetingen van de geul en regelwerken voornamelijk op basis van google earth gegevens gebaseerd. Ook hierin is gevarieerd om tot zo goed mogelijke resultaten te komen.

Berekende afvoer Grote Geul

Het reguleringswerk aan de instroomzijde bestaat uit een brug. Deze brug heeft een drempel van 0,88 m +NAP. De afvoer door de Grote Geul wordt hier grotendeels door bepaald. Vanaf 4,33 m +NAP zal de waterstand boven het wegdek van de brug komen. Hierdoor neemt de breedte van de instroomopening significant toe waardoor de afvoer in de nevengeul ook toe neemt. Beide afvoeren zijn met de overlaatformule berekend.

Metingen van de afvoer van de grote geul laten rond de 2600 m³/s een knik zien waarna de afvoer sterker toeneemt. Ter hoogte van de knik is de hoogte van de brug bereikt is, waardoor de drempelbreedte significant toeneemt en meer water over de drempel kan stromen.



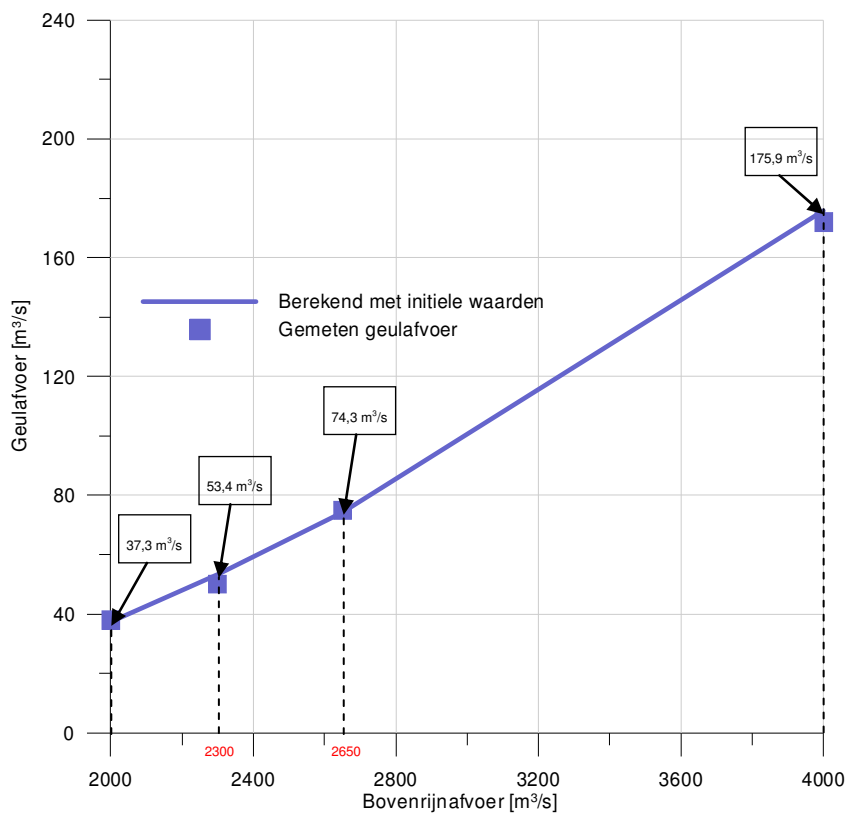
Figuur 4-2: Berekende en gemeten afvoer Grote Geul Gamerensche Waard

Berekende afvoeren verschillen behoorlijk met de gemeten waarden. Het lijkt erop dat zowel de gegeven drempelhoogte onder de brug alsmede de gegeven hoogte van het brugdek niet juist zijn. Wanneer deze beide waarden verlaagd worden kunnen de gemeten nevengeulafvoeren waarden redelijk gereproduceerd worden.

Berekende afvoer Westgeul

De westgeul van de Gamerensche Waard is geschematiseerd als een geul met een overlaat aan de instroomzijde en een vrije uitstroom. De drempel aan de instroomzijde bepaalt bij welke rivierwaterstand de geul gaat meestromen. Dit is voor alle berekende Bovenrijnafvoeren het geval. De waterstanden ter hoogte van de instroomopening liggen hoger dan de drempelhoogte. Voor de breedte van deze drempel is de totale breedte van de instroomopening genomen, dat wil zeggen de breedte van de drempel+breedte van de naastgelegen geul.

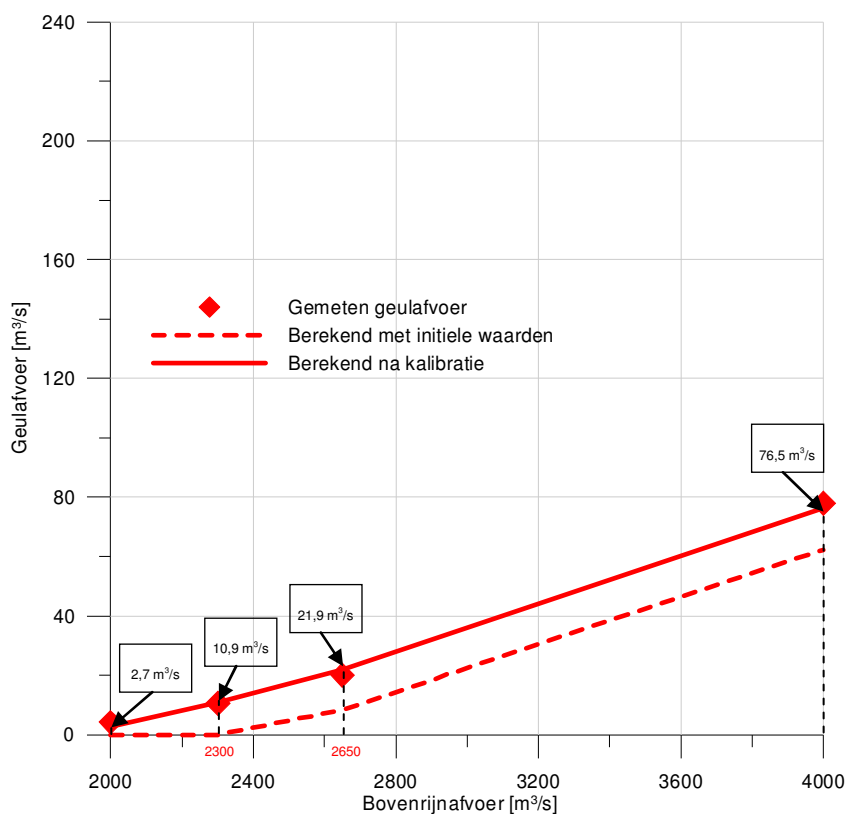
De berekende nevengeulafvoeren komen goed overeen met de gemeten waarden, waardoor geen nadere kalibratie hoeft plaats te vinden. Het verband is redelijk lineair, dat wil zeggen bij een hogere Bovenrijnafvoer vindt er ook een hogere nevengeulafvoer plaats.



Figuur 4-3: Berekende en gemeten afvoer Westgeul Gamerensche Waard

Berekende afvoer Oostgeul

De schematisatie van de Oostgeul komt overeen met schematisatie van de Westgeul. Dat wil zeggen dat de inlaatconstructie uit een overlaat bestaat en er vrije uitstroom plaatsvindt. Berekende nevengeulafvoeren voor de Oostgeul laten een lagere waarde zien dan de gemeten waarden. Het verloop van de berekende nevengeulafvoeren komt echter wel overeen met de gemeten waarden. Een mogelijke verklaring voor dit verschil in afvoeren kan gezocht worden in de drempelhoogte of de waterstand ter hoogte van de in- en uitstroomopeningen die in de berekeningen gebruikt is.



Figuur 4-4: Berekende en gemeten afvoer Oostgeul Gamerensche Waard

Na aanpassing (verlaging) van de drempelhoogte lijken de berekende en gemeten nevengeulatvoeren redelijk met elkaar overeen te komen.

Het lijkt erop dat in de Oostgeul van de Gamerensche Waard hebben zich na aanleg morfologische veranderingen voorgedaan. De drempel is door sedimentatie in de jaren na aanleg hoger komen te liggen. Het is mogelijk dat het verschil in drempelhoogte tussen de initiële en gekalibreerde berekeningen door aanzanding van de drempel veroorzaakt wordt.

5 TOEPASSING OP OVERIGE GEULEN

In het vorige hoofdstuk is voor de nevengeulen van de Gamerensche Waard de nevengeulafvoer bepaald. In dit hoofdstuk wordt voor drie andere nevengeulen: de Klompenwaard, Bakenhof en Vreugderijkerwaard dezelfde methode gebruikt om de afvoer te bepalen. Voor deze drie nevengeulen zijn in tegenstelling tot de Gamerensche Waard geen afvoermetingen beschikbaar, waardoor er geen kalibratiemogelijkheden zijn. Er is slechts beperkte informatie mbt de geulgeometrie beschikbaar. Het grootste deel van de gebruikte afmetingen is gebaseerd op luchtfoto's (google earth). Dit introduceert een onnauwkeurigheid in de resultaten.

5.1 Klompenwaard

De nevengeul in de Klompenwaard is gelegen aan de Waal. De afvoer wordt geregeld door:

- een hoge drempel aan bovenstroomse zijde, en
- een versmalling aan het uiteinde van de geul.

Inmiddels heeft aanzanding bovenstrooms van het regelwerk er voor gezorgd dat de bovenstroomse bodem min of meer gelijk is aan de kruin van de inlaat.



Figuur 5-1: Overzicht nevengeul Klompenwaard (bron: google earth)

Eigenschappen inlaatconstructie

Type	Overlaat
Drempelhoogte	12,05 m +NAP
Drempelbreedte	33 m

Dimensies geul

Lengte geul	1235 m
Breedte geul	35 m
bodem geul	6,75 m +NAP

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type Vrije uitstroomopening

5.1.1 Berekende afvoer

De schematisatie voor de nevengeul in de Klompenwaard lijkt in opzet erg op die van de West- en Oostgeul van de Gamerensche Waard. De instroomopening is doormiddel van een overlaatconstructie geschematiseerd en er vindt vrije uitstroming plaats.

De waterstanden ter plaatse van de instroomopening van de nevengeul overschrijden echter niet de drempelhoogte voor de geanalyseerde Bovenrijnafvoeren. Hierdoor vindt er voor de gevraagde Bovenrijnafvoeren geen afvoer door de nevengeul plaats.

Uit analyse van de waterstandsmetingen blijkt dat de Klompenwaard pas bij een Bovenrijnafvoer van 4513 m³/s gaat meestromen.

5.2 Vreugderijkerwaard

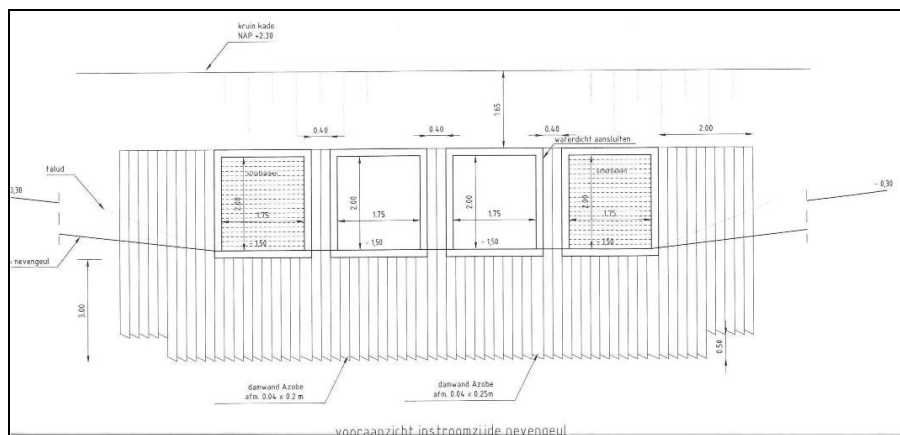
De nevengeul in de Vreugderijkerwaard is gelegen aan IJssel. Aan zowel de instroomzijde als uitstroomzijde van de geul is een aantal duikers aangelegd. Deze reguleren de afvoer van de nevengeul. De bodem van deze duikers liggen op -1,5 m +NAP.



Figuur 5-2: Overzicht nevengeul Vreugderijkerwaard (bron: google earth)

Eigenschappen inlaatconstructie

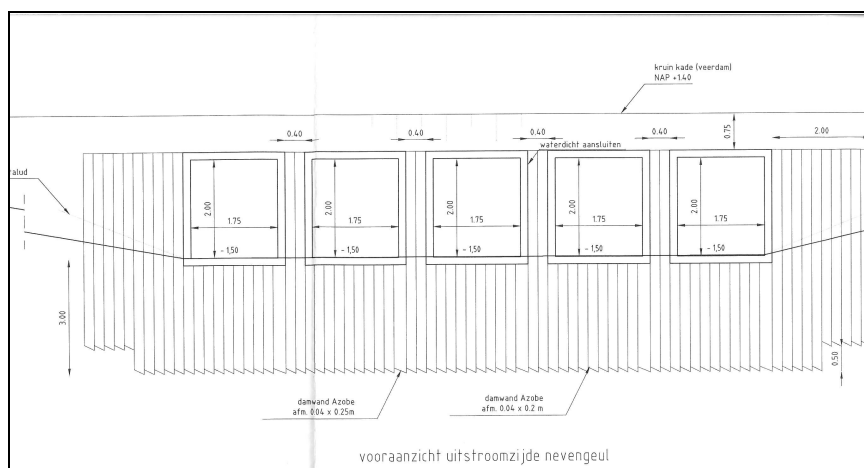
Type	Duikers
Aantal	2
Hoogte	2,0 m
Breedte	1,75 m
Totaal doorstroomoppervlak	7 m ²



Figuur 5-3: Inlaatconstructie Vreugderijkerwaard (4 duikers waarvan 2 afgesloten)

Dimensies geul (google earth)

Lengte geul	1100 m
bodem geul	-1,5 m +NAP
Breedte geul	70 m



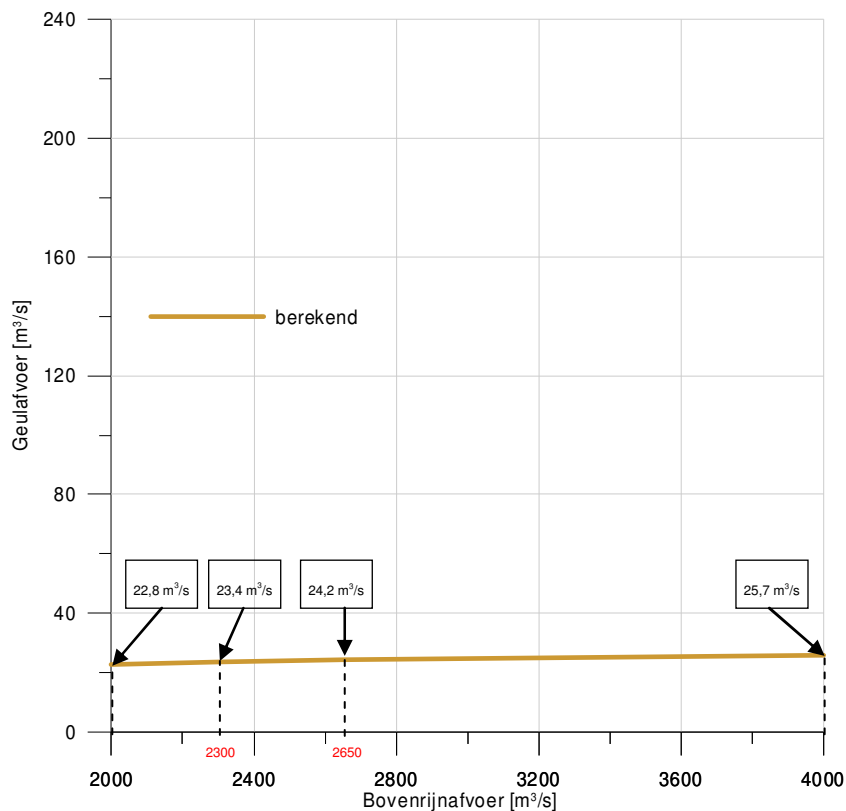
Figuur 5-4: Uitlaatconstructie Vreugderijkerwaard (5 duikers)

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type	Duikers
Aantal	5
Hoogte	2,0 m
Breedte	1,75 m
Totaal doorstroomoppervlak	17,5 m ²

5.2.1 Berekende Afvoer

De Vreugderijkerwaard bestaat zowel aan de instroomzijde als uitstroomzijde uit duikers. Deze duikers (met name aan de instroomzijde) bepalen in grote mate de afvoer door de nevengeul. In de schematisatie van deze geul is voor de duikers rekening gehouden met geheel ondergelopen constructie alswel gedeeltelijk ondergelopen constructies. Bij gedeeltelijk ondergelopen constructies wordt niet het volledige doorstroomoppervlak van de duiker benut. Dit is bij volledig ondergelopen constructies wel het geval.



Figuur 5-5: Berekende afvoer nevengeul Vreugderijkerwaard

In de doorgerekende gevallen staan de duikers volledig onder water. De nevengeulafvoer neemt nauwelijks toe met de toenemende Rijnafvoer. Dit komt doordat het verval van de rivier tussen beide uiteinden van de nevengeul weinig verandert, en hierdoor het drukverschil over de duikers min of meer constant blijft.

Voor de geulen met duikers als regelwerken zijn geen afvoermetingen beschikbaar. Hierdoor is een calibratie van de geulparameters niet nodig, en is de onzekerheid van de berekende afvoer groter dan in het geval van de Gamerensche Waard.

5.3 Bakenhof

De nevengeul de Bakenhof is gelegen aan de Nederrijn. De regelwerken voor de Bakenhof zijn in 2003 aangelegd. Aan de instroomzijde bestaat deze uit een hoge drempel. De uitstroomopening van de geul bestaat uit een duiker met een oppervlakte van 5.91m² en is gelegen op +NAP 6.70m.



Figuur 5-6: Overzicht nevengeul Bakenhof (bron: google earth)

Type	Overlaat
Drempelhoogte	10,5 m +NAP
Breedte	11 m

Dimensies geul (google earth)

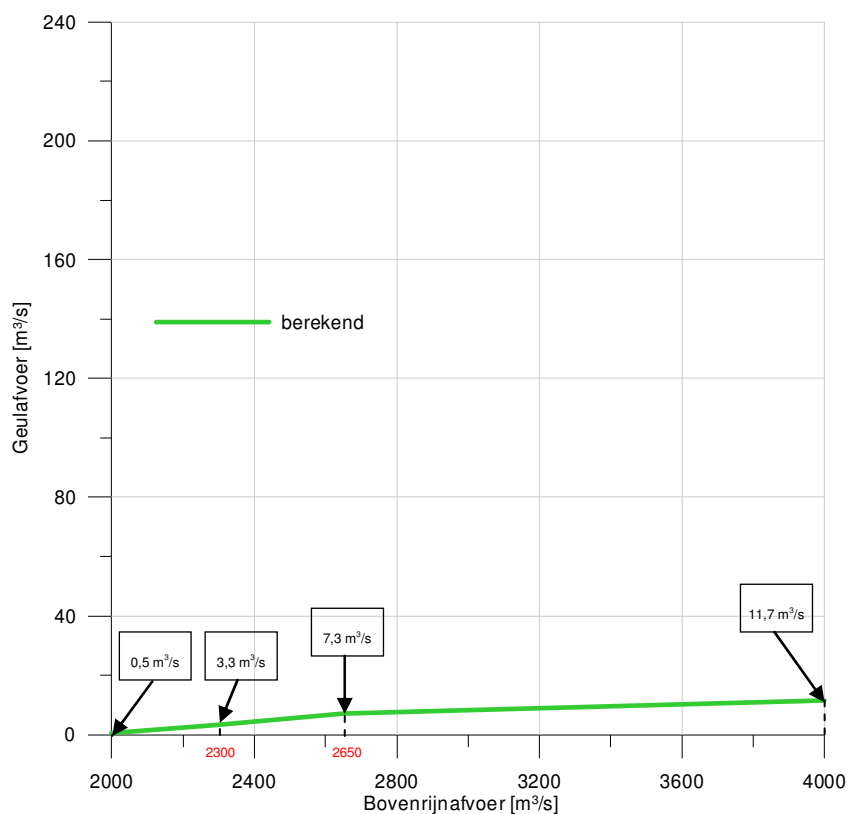
Lengte Geul	1000 m
bodem geul	6,5 m +NAP
Breedte geul	60 m

Eigenschappen uitlaatconstructie

Type	Duiker
Aantal	1
Hoogte	0,73 m
Breedte	8 m
Totaal doorstroomoppervlak	5,91 m ²

5.3.1 Berekende Afvoer

De schematisatie van de nevengeul bij de Bakenhof bestaat uit een overlaat aan als instroomopening en een duiker als uitstroom. De berekeningen zijn uitgevoerd met een aangenomen waarde van 8 m voor de drempelhoogte aan de instroomopening, aangezien bij een gegeven drempelhoogte van 10,5 m tijdens Lobith afvoeren kleiner dan 4000 m³/s geen geulafvoer optreedt, hetgeen niet reëel geacht wordt.



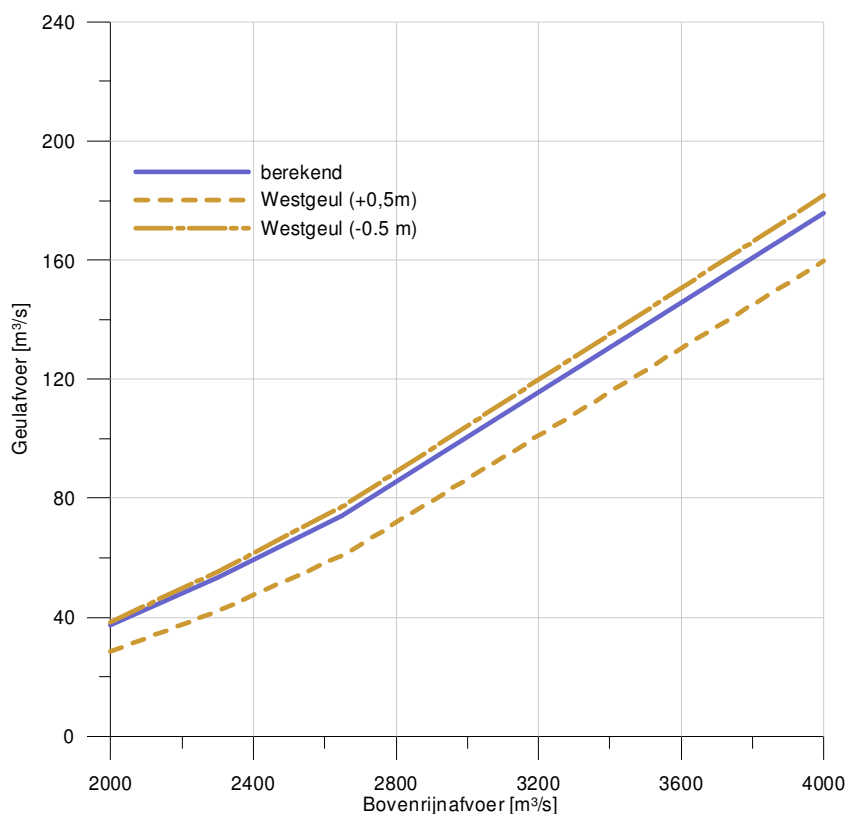
Figuur 5-7: Berekende afvoer van nevengeul Bakenhof

6 VERWACHTE TOEKOMSTIGE ONTWIKKELING NEVENGEUL

Om de verwachte toekomstige ontwikkelingen te bepalen voor de verschillende nevengeulen is de morfologische verandering in de tijd van belang. Hier is echter niet veel informatie over beschikbaar. Met behulp van de eerder bepaalde afvoerrelaties kan een echter wel een inschatting gegeven worden over de effecten van morfologische veranderingen op de nevengeulafvoer. Om een inschatting van deze effecten in kaart te brengen is de gevoeligheid van een drietal parameters onderzocht. Als voorbeeld is de Westgeul van de Gamerensche Waard genomen.

6.1 Gevoeligheid parameters

De bodemhoogte in de nevengeul bepaalt de waterdiepte en daarmee de afvoer door de nevengeul. Om de invloed van de bodemhoogte op de nevengeulafvoer te onderzoeken is de berekening voor drie verschillende bodemhoogtes uitgevoerd. Hierin is de bodem met een meter opgehoogd / verlaagd.

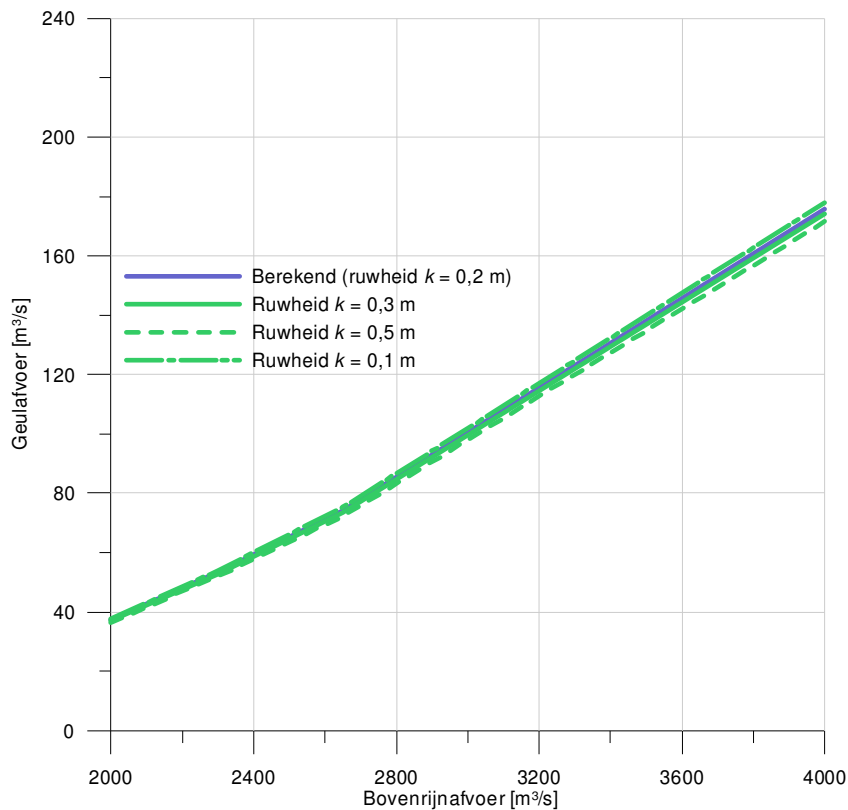


Figuur 6-1: Afvoer westgeul Gamerensche Waard voor verschillende bodemhoogtes

De variatie in de bodemhoogte heeft geringe invloed op de afvoer door de nevengeul (Figuur 6-1). Bij een toenemende bodemhoogte, in geval van aanzanden van de nevengeul, zal de totale afvoer van de geul afnemen. De invloed hiervan is echter beperkt.

Naast de bodemligging heeft ook de ruwheid van de nevengeul invloed op de nevengeulafvoer. Door met name begroeiing in de geul kan de ruwheid en daarmee de weerstand in de geul behoorlijk toenemen. Om

het effect te bekijken op de afvoer zijn de berekeningen voor de west geul voor een viertal ruwheidcoëfficiënten berekend.

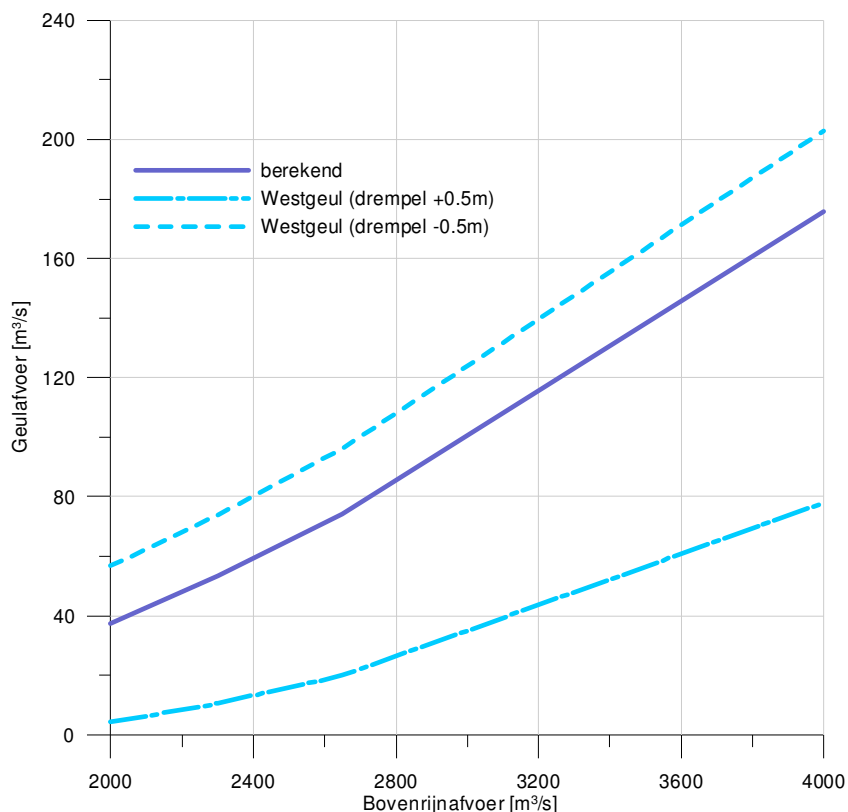


Figuur 6-2: Afvoer westgeul Gamerensche Waard voor verschillende Nikuradse ruwheidscoëfficiënten

De bodemruwheid heeft slechts een zeer beperkte invloed op de totale afvoer door de nevengeul. Variatie in de ruwheidcoëfficiënt laat nagenoeg geen verschil zien in de nevengeulafvoer. Het effect van de ruwheid op de afvoer is ook afhankelijk van de afvoer. Bij hogere afvoeren heeft de ruwheid relatief meer invloed dan voor lagere afvoeren.

Het effect van de drempelhoogte van de instroomopening is van grotere invloed op de nevengeulafvoer (Figuur 6-3).

De drempelhoogte aan de instroomzijde bepaalt ten eerste of een nevengeul wel of niet gaat meestromen. Hierdoor heeft de drempelhoogte een grote invloed op de nevengeulafvoer. Berekeningen zijn uitgevoerd voor een drietal drempelhoogtes voor de westgeul in de Gamerensche Waard.



Figuur 6-3: Afvoer westgeul Gamerensche Waard voor verschillende drempelhoogtes

Een variatie van een halve meter in drempelhoogte van een 0.5 meter hoger reduceert de afvoer door de nevengeul met gemiddeld $28\text{m}^3/\text{s}$. Daarnaast wordt het punt waarvandaan de nevengeul gaat meestromen ook beïnvloed.

6.2 Verwachte toekomstige ontwikkeling

Een van de kenmerken van een nevengeul is dat er niet gedurende het hele jaar afvoer plaatsvindt. Dit houdt in dat er tijden met zeer lage stroomsnelheden tot geen stroming bestaan. In deze periodes is er voor het zwevende sediment dat in het water aanwezig is, de tijd om neer te slaan. Dit heeft aanslibbing van de nevengeul tot gevolg. Doordat de stroomsnelheid in de nevengeul voorbij het regelwerk afneemt, kan zich hier ook zand afzetten. Doordat de bodem van de nevengeulen langzamerhand aanzand, neemt de afvoercapaciteit van de geul af (zie Figuur 6-1). Bij hoge afvoeren kan echter ook erosie van de nevengeul optreden, waardoor zijn afvoercapaciteit juist toeneemt.

Aan de bovenstroomse zijde van de instroomopening kan ten tijde van lage afvoer significante hoeveelheden sediment afgezet worden. Hierdoor kan de drempel aanzanden, waardoor de drempelbreedte en in een aantal gevallen zelfs de drempelhoogte toeneemt. Dit is waargenomen voor de Klompenwaard. Dit kan een grote invloed op de afvoer van de geul hebben.

Met name in de geulen die niet het gehele jaar door afvoeren bestaat er de kans dat er begroeiing ontstaat. Dit is met name zichtbaar voor de geulen van de Gameraensche Waard. Bovenstaande gevoeligheidssommen laten echter zien dat de invloed van begroeiing (ruwheid) op de nevengeulafvoer, slechts beperkt is.

Aanzanding van de drempel, begroeiing van de geul en aanzanding van de geul veroorzaken een afname van de afvoer van de nevengeul. Een afname in de afvoer, in de meeste gevallen in combinatie met een afname in stroomsnelheid, heeft uiteindelijk weer het gevolg dat er nog meer aanzanding in de nevengeul plaatsvindt. Dit kan er uiteindelijk toe leiden dat de nevengeul dicht sedimenteert. Om dit te voorkomen is monitoring en onderhoud van de nevengeul noodzakelijk.

7 CONCLUSIES

1. Er zijn weinig gegevens voor de analyse beschikbaar. Met name actuele geulgeometrie is niet beschikbaar. Dit introduceert enige onnauwkeurigheid in de resultaten.
2. Voor de Gamerensche Waard zijn afvoermetingen beschikbaar. De berekende afvoeren komen redelijk goed overeen met de metingen. Er zijn echter bij lage afvoeren verschillen die waarschijnlijk te wijten zijn aan de afwijking tussen de ontwerp en actuele hoogte van de inlaatwerken. De methode lijkt goed bruikbaar om nevengeulafvoeren te berekenen.
3. De nevengeulafvoeren voor de Vreugderijkerwaard, Klompenwaard en de Bakenhof zijn berekend zonder vergelijking met afvoermetingen. Hierdoor kunnen de resultaten minder nauwkeurig zijn.
4. Met de methode kan de gevoeligheid voor morfologische veranderingen worden bepaald. Met name de drempelhoogte en bodemligging hebben significante invloed op de nevengeulafvoer. Er ontbreken echter voldoende gegevens om de morfologische effecten te voorspellen.

COLOFON

Opdrachtgever	: WaterdienstWaterdienst
Project	: Voorspellen afvoer nevengeulen
Dossier	: C9849.01.001
Omvang rapport	: 33 pagina's
Auteur	: Johan Henrotte
Bijdrage	: Sander Zweers
Interne controle	: Marius Sokolewicz
Projectleider	: Marius Sokolewicz
Projectmanager	: Teunis Louters
Datum	: 1 Februari 2010
Naam/Paraaf	:



DHV B.V.

Water

Laan 1914 nr. 35

3818 EX Amersfoort

Postbus 1132

3800 BC Amersfoort

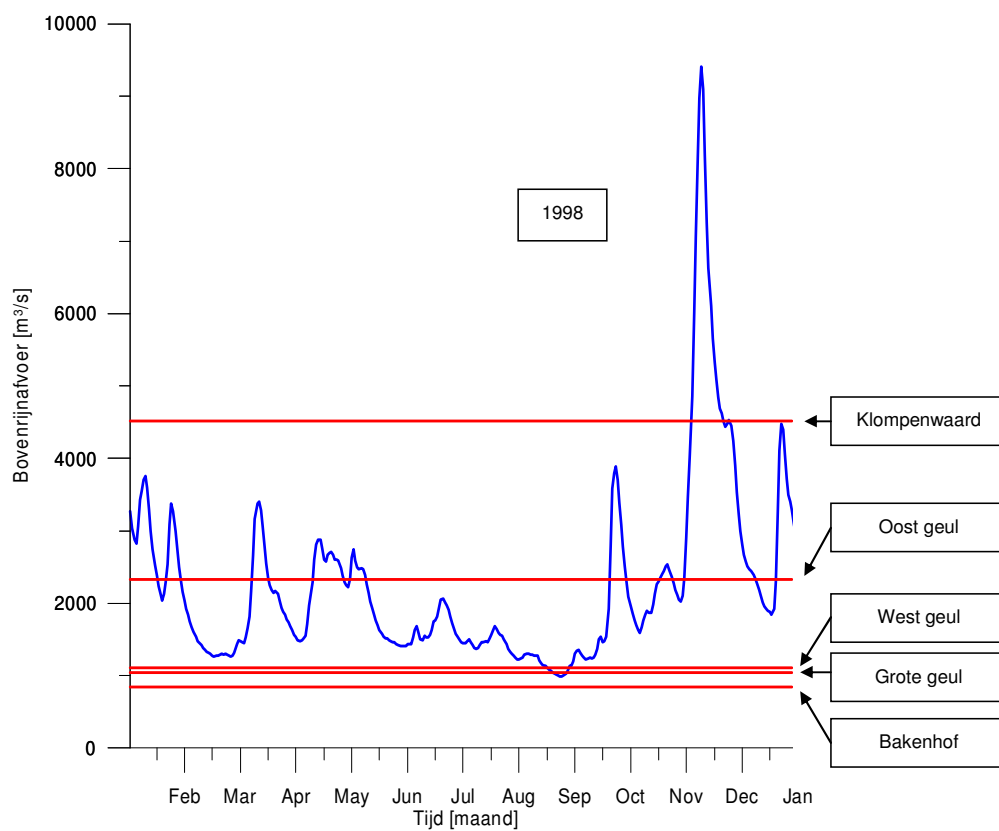
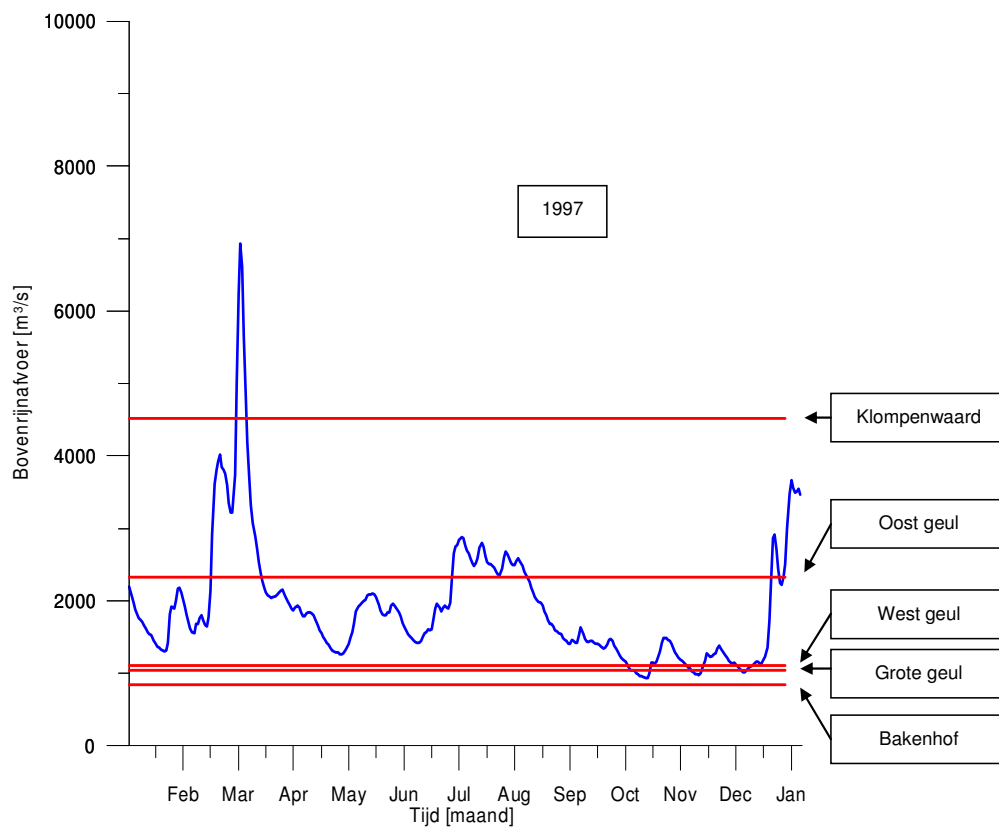
T (033) 468 20 00

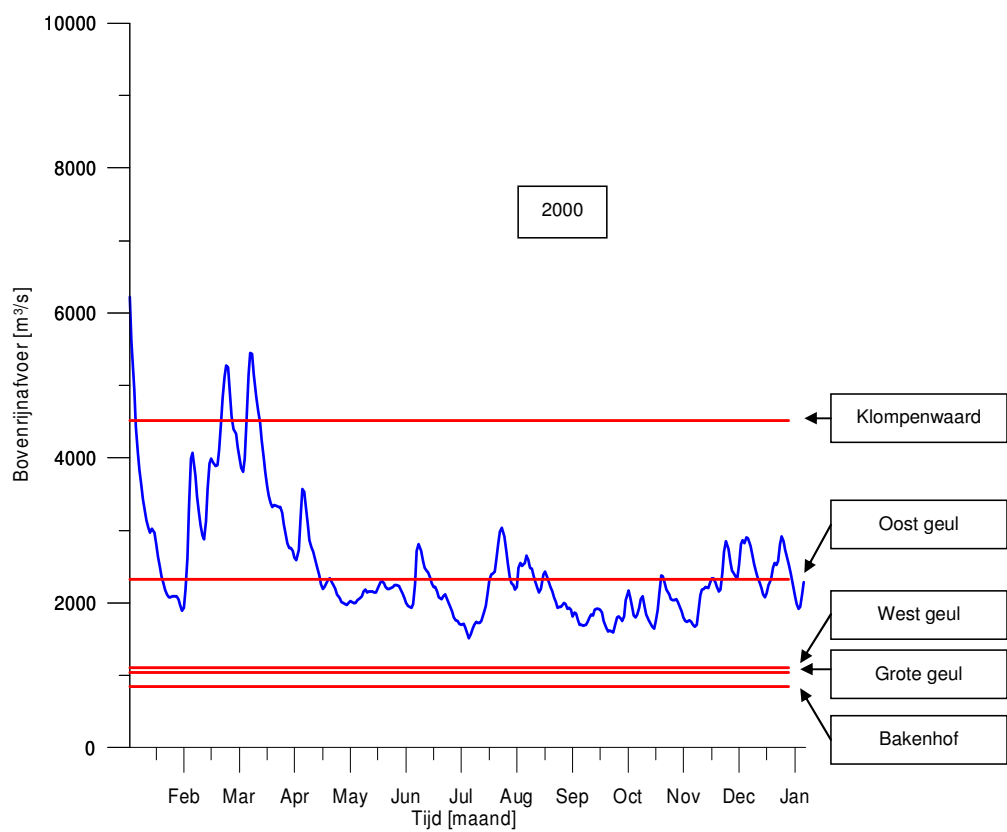
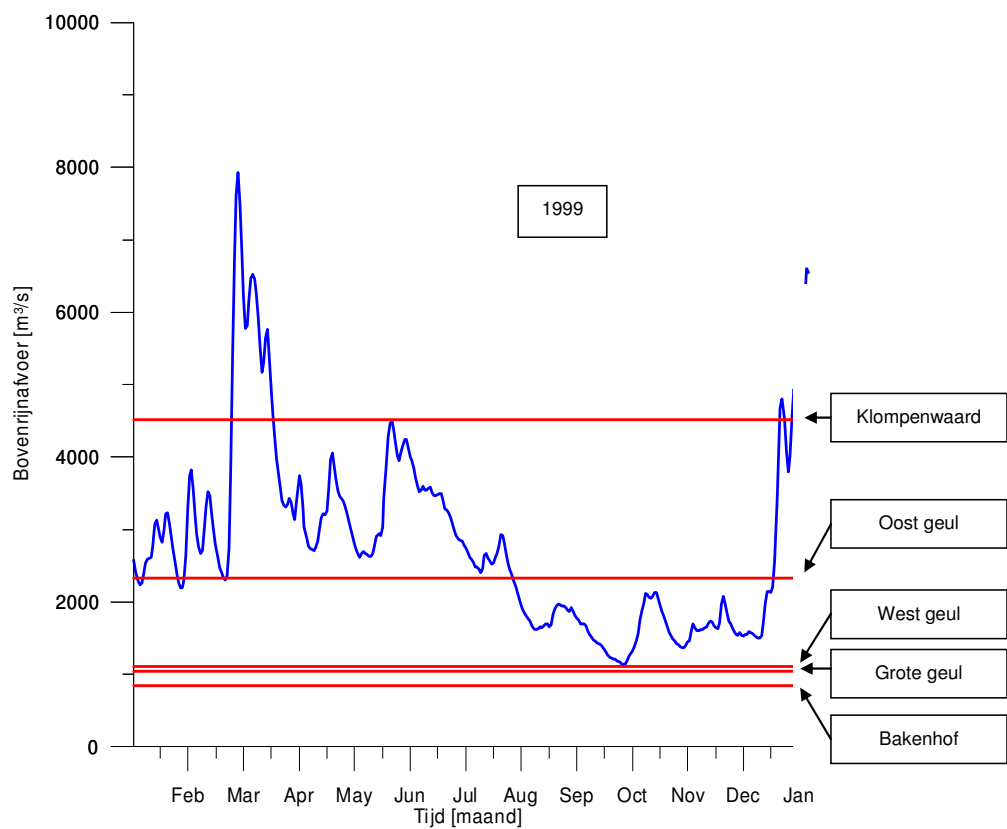
F (033) 468 28 01

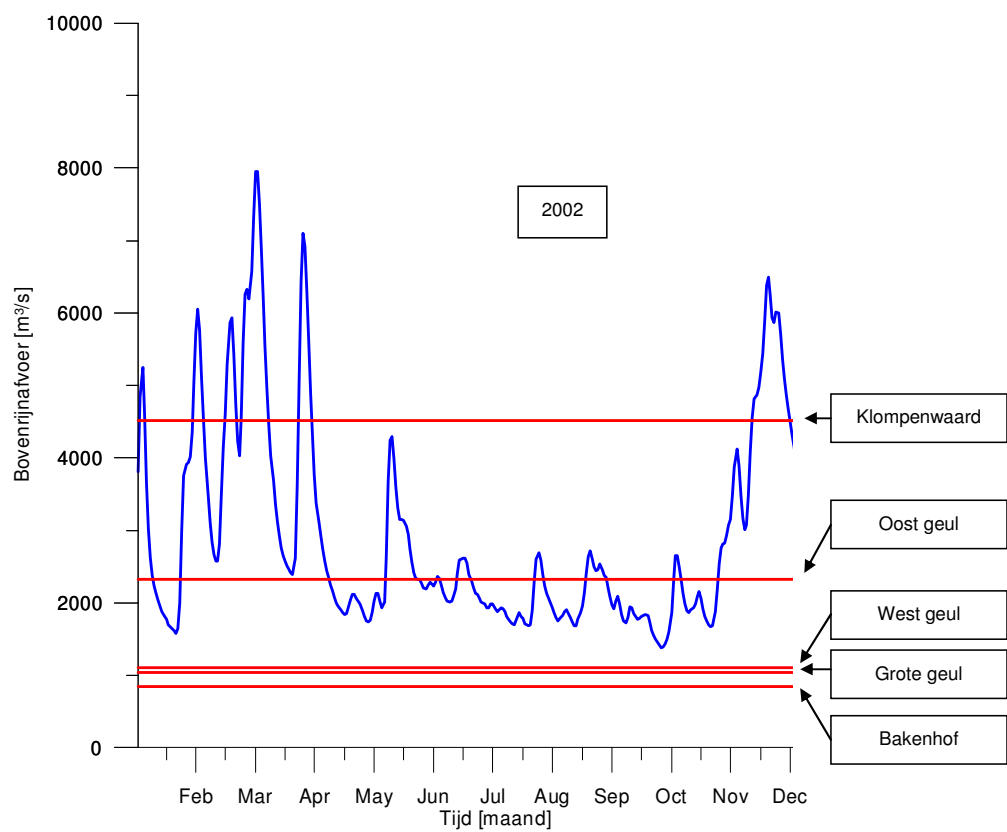
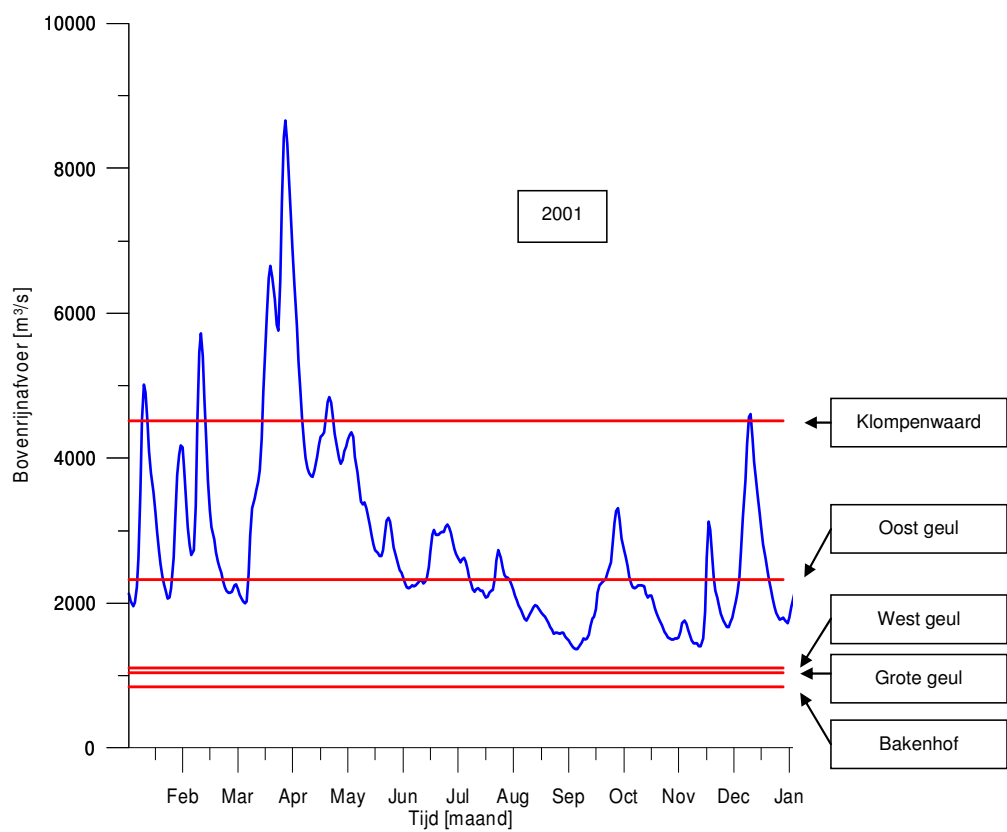
E info@dhv.com

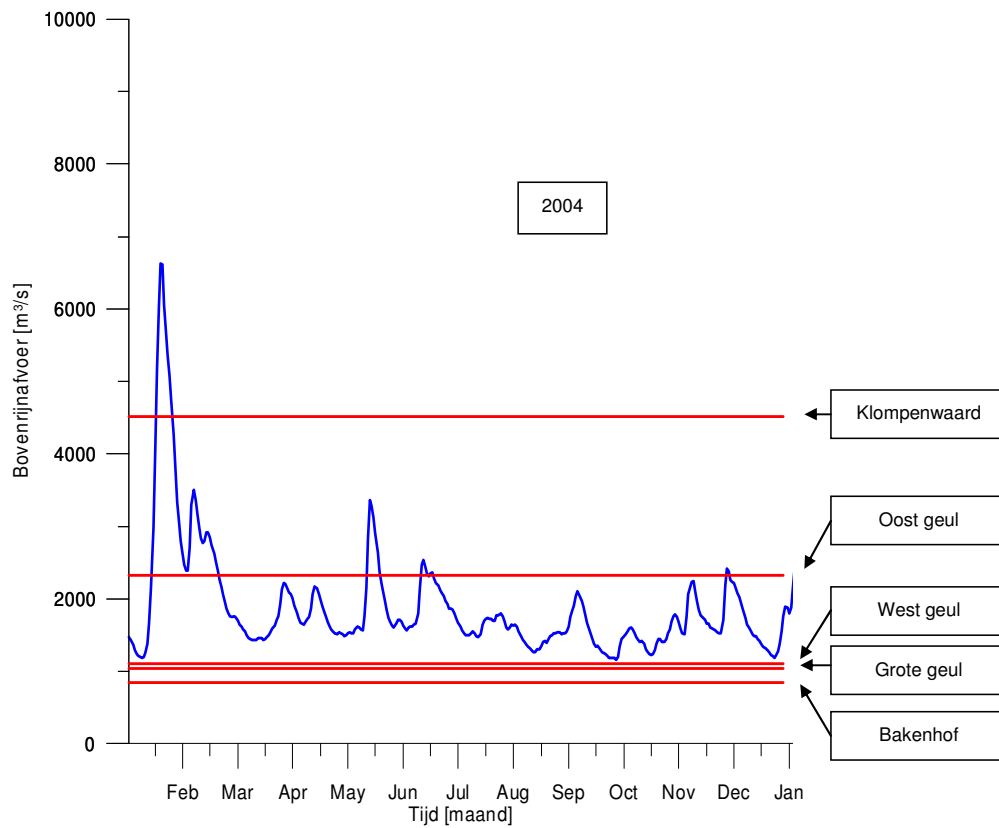
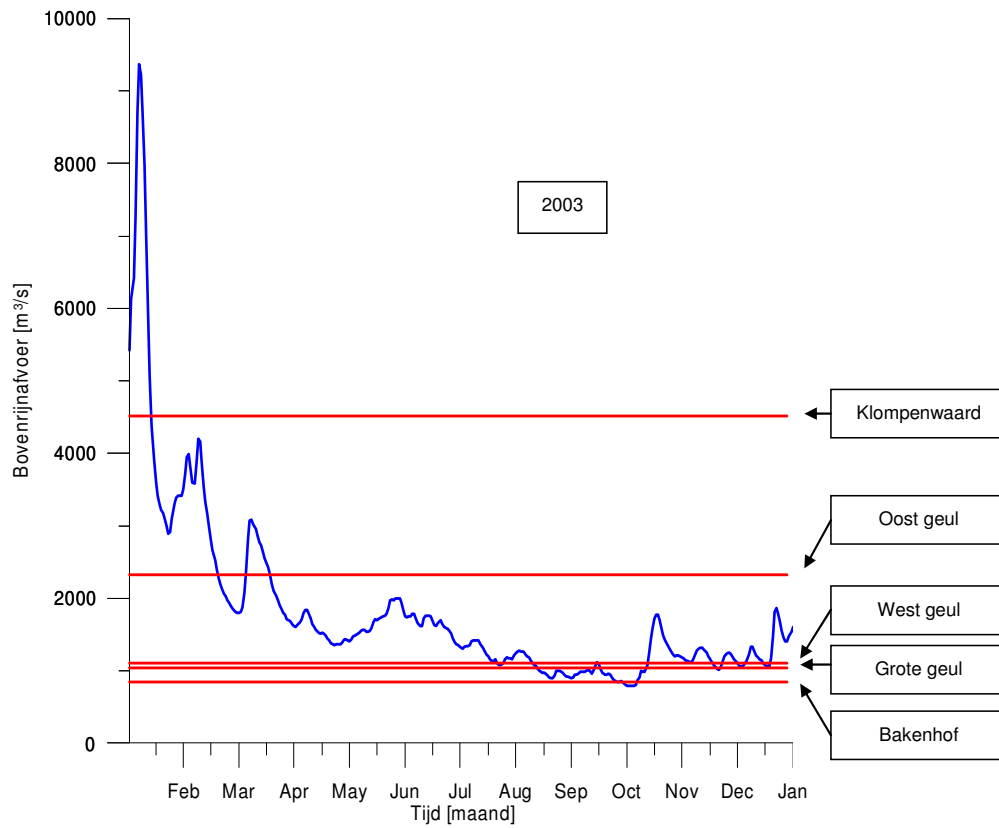
www.dhv.nl

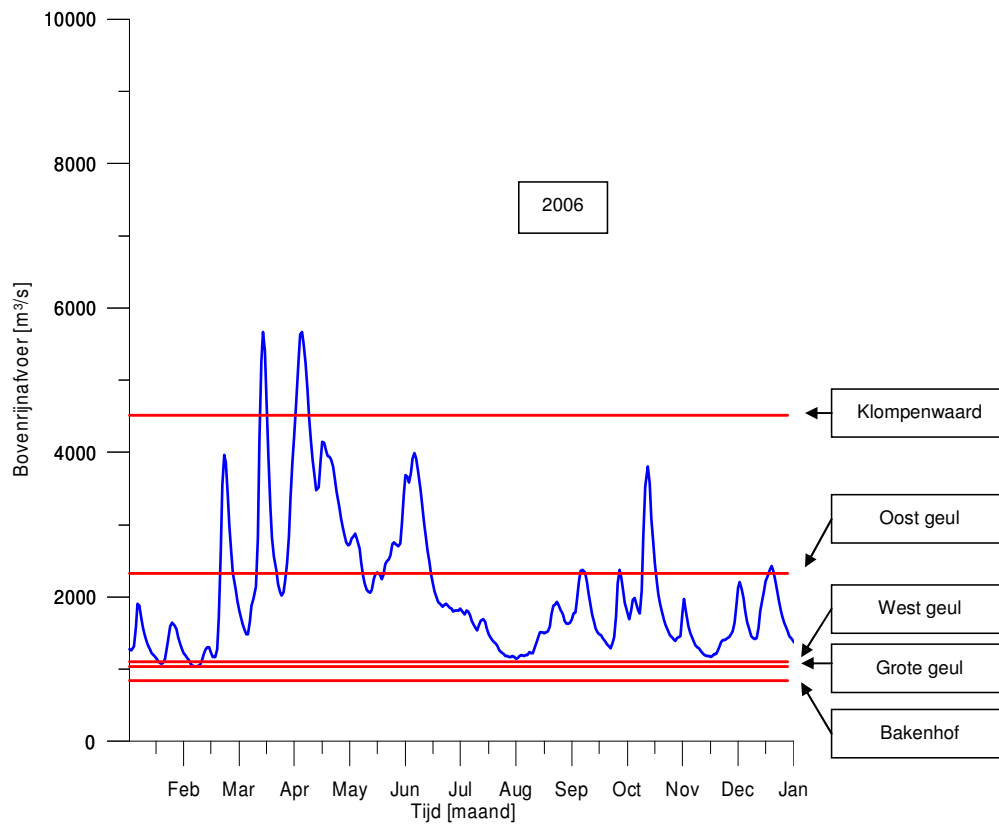
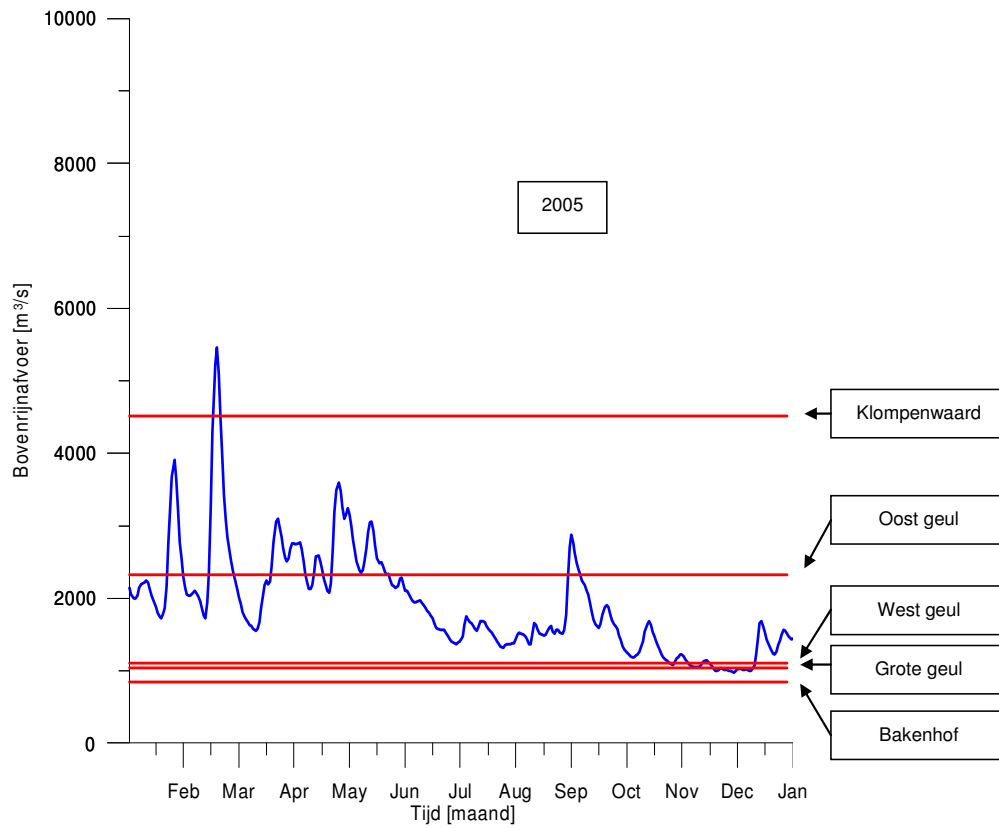
BIJLAGE 1 Afvoerreeksen 1997-2008

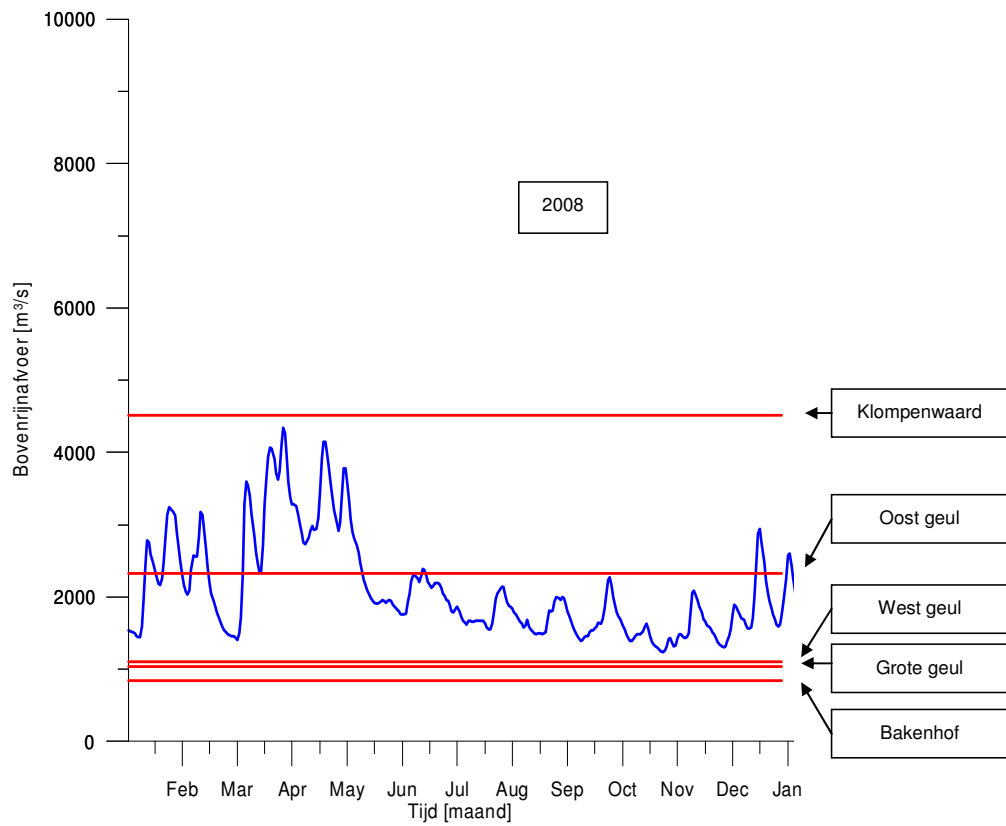
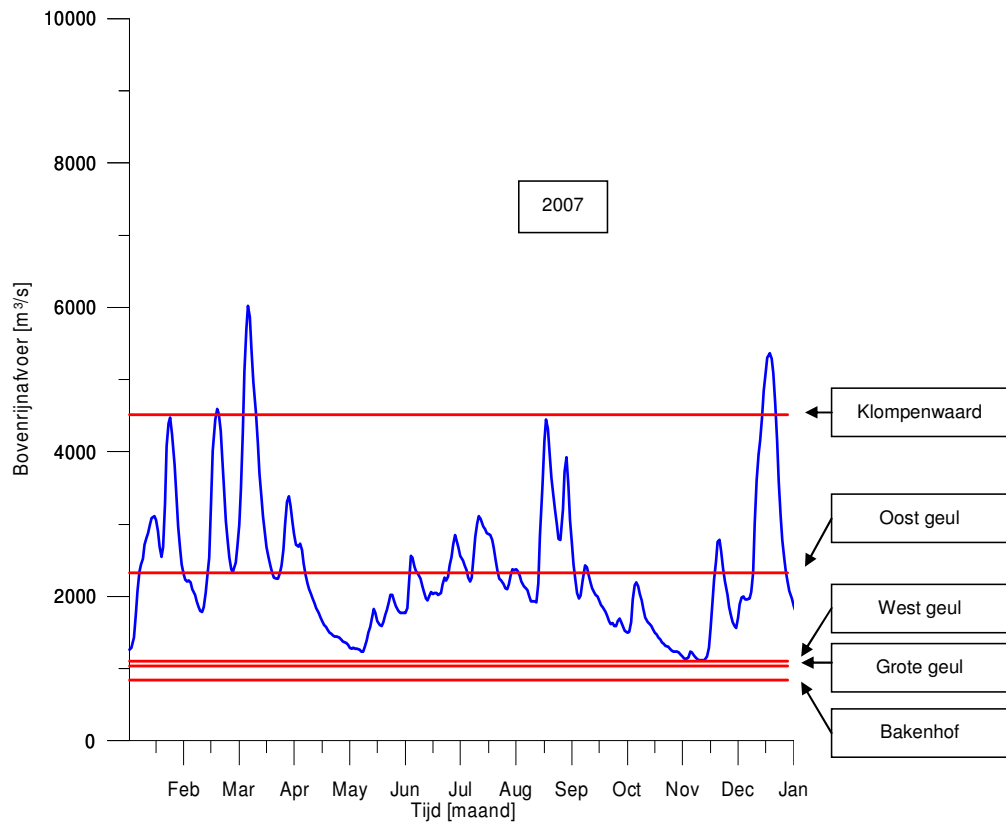












BIJLAGE 2 Relatieve Geulafvoer

