

## 1 Aanleiding

Deze memo beschrijft kort hoe te komen tot een vaste set afvoeren voor het gebruik van DFAST-mi.

DFAST-mi is een hulpmiddel bij het bepalen van morfologische effecten. Het wordt ingezet voor een snelle schatting van effecten en volstaat als gebruik van DMOR-berekeningen niet nodig zijn. Het kan voorkomen dat een project zowel DFAST-mi als DMOR gebruikt. Om dat zo consistent mogelijk te kunnen doen is voor beiden het gebruik van vergelijkbare hydraulische simulaties efficiënt. Met andere woorden, in het ideale geval gebruiken DMOR en DFAST dezelfde afvoersituaties als basis voor analyse van morfologische effecten. Dat is op het moment van schrijven echter nog niet mogelijk; de DMOR modellen voor de Rijntakken zijn in ontwikkeling, een passende afvoerreeks is daarvan nog niet beschikbaar.

## 2 Welke afvoersituaties zijn nodig?

Met DFAST-MI is het mogelijk om de effectbepaling op een vaste, vooraf gespecificeerde set afvoersituaties te baseren. Bovendien kan deze set (via frequentie en volgorde van de afvoersituaties) toegepast worden in de vorm van scenario's met bijvoorbeeld overwegend "natte", "droge" en "gemiddelde" jaren. Maar dit laatste is niet geverifieerd (en niet operationeel?).

Voor bepaling van morfologische effecten zijn de afvoersituaties nodig die de impact van ingrepen op de stroming weergeven

- i) in alle afvoerregimes van de Rijn of Maas met mobiel bodemsediment
- ii) op een schaal die past bij de ingreep

Het eerste is een systeemeigenschap en dat leidt tot onderscheid in karakteristieke regimes. Het tweede volgt uit de aard en maatvoering van de ingrepen die worden verwacht en leidt tot het *aantal afvoersituaties waarmee elk karakteristiek regime wordt beschreven*.

Om alle eventuele ingrepen te ondervangen die voor toekomstige toepassing denkbaar zijn, is een groot aantal afvoersituaties nodig en dat betekent in veel gevallen onnodig rekenwerk. Om dat te voorkomen is een pragmatische afweging nodig. Een voorbeeld daarvoor zijn de Delft3D morfologie modellen voor de Rijntakken, die een vaste afvoerreeks gebruiken. Deze reeks is weergegeven in Tabel 1 met een aanvulling voor de Maas ter indicatie.

Boven-Rijnafvoer [m <sup>3</sup> /s] Delft3D	Kans van onderschrijden 1990-2020	Boven-Maas afvoer [m <sup>3</sup> /s]
1203	0.113	38
1635	0.349	83
2250	0.674	225
3053	0.853	467
3824	0.921	663
4717	0.964	884
6151	0.9876	1236
8592	0.9985	2224

Tabel 1 Afvoeren Delft3D model Rijntakken met equivalente reeks voor de Maas.

### 3 Onderscheid in afvoerregimes

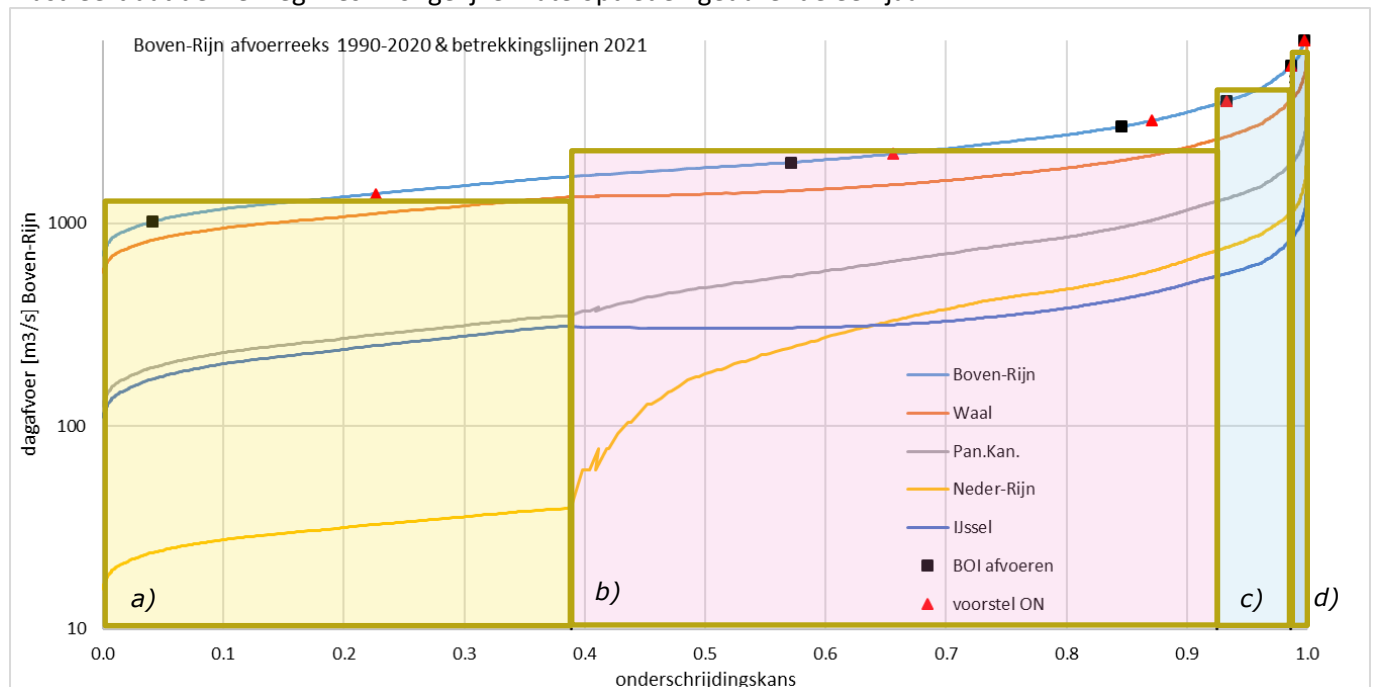
Een eerste stap voor het bepalen van de afvoersituaties is het onderscheid in regimes. In de Maas en Rijntakken worden met toenemende rivierafvoer drie afvoerregimes onderkend; 1) stuwen vrijwel gesloten (afgezien lekdebiet etc); 2) overgang van gestuwd naar vrij-afstromend en 3) vrij-afstromend zonder invloed van stuwen. De invloed daarvan varieert uiteraard per traject. Behalve de stuwen is er de invloed van de normalisatie op het stroombeeld. Dat levert met toenemende rivierafvoer grofweg drie stroombeeld-situaties i) alleen zomerbed-vullend; ii) met ontwikkelende uiterwaardstroming en iii) met ontwikkelde uiterwaardstroming.

Omdat stuwen vooral gericht zijn op peilbeheer in het zomerbed, worden hier als vereenvoudiging gesteld dat beide regimes min of meer samenvallen in een vereenvoudigde indeling van Tabel 2. Omdat alle stuwen eigenlijk afzonderlijk worden bediend is deze generalisatie een sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid.

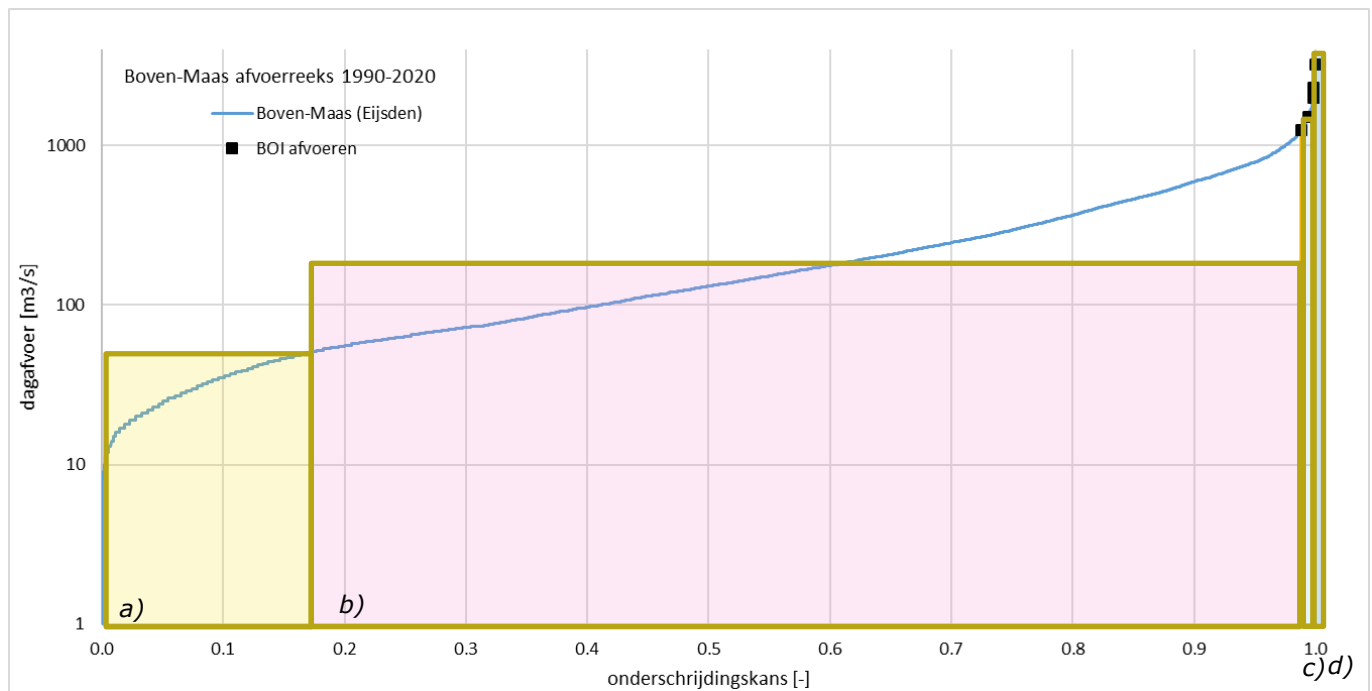
Regime	afvoer Boven-Maas [m <sup>3</sup> /s]	afvoer Boven-Rijn [m <sup>3</sup> /s]
a) alleen zomerbed gevuld, stuwen vrijwel gesloten	<50	<1700
b) alleen zomerbed gevuld, stuwen in overgang naar volledig open	50-1250	1700-3870
c) ontwikkelende uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	1250-2300	3870-6000
d) ontwikkelde uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	>2300	>6000

Tabel 2 Vereenvoudigde indeling afvoerregimes Rijn en Maas.

Er worden vier karakteristieke regimes onderscheiden. Een relatieve duur van elk regime kan voor de bijbehorende afvoerrange worden afgeleid uit een historische afvoerreeks zoals 1990-2020. Figuur 1 geeft de vier regimes voor Rijn en Maas weer, met behulp van de afvoeren uit 1990-2020. Dit illustreert dat de vier regimes in ongelijke mate optreden gedurende een jaar.



Figuur 1-a Karakteristieke afvoerregimes Rijntakken.



Figuur 1-b Karakteristieke afvoerregimes Maas.

DFAST-MI is een inschatting van de morfologische reactie op de invloed van een maatregel op stroomsnelheden in de hoofdgeul. In elk van de vier regimes kan sprake zijn van een invloed op de hydraulica. Dat betekent dat in elk van de vier regimes tenminste één afvoersituatie moet worden beschouwd, tenzij stroomsnelheden zo laag zijn (minder dan 0.3 m/s) dat nauwelijks sprake is van morfodynamiek.

#### 4 Minimaal aantal karakteristieke afvoersituaties per regime

In deze sectie worden de afvoersituaties bepaald die relevant zijn voor effectbepaling, indien de hydraulische impact van de ingreep voor alle rivierafvoeren binnen een regime niet zou veranderen. Dat levert een minimum aantal afvoersituaties per regime op.

De grootte van de morfologische reactie is min of meer evenredig met de grootte en duur van de relatieve forcering (snelheidsverandering) en de waterdiepte die daarbij hoort. Daarom weegt de duur van een regime mee bij het bepalen van karakteristieke afvoer voor elk regime.

##### Regime a) alleen zomerbed gevuld, stuwen vrijwel volledig gesloten

In dit regime zijn de stuwen maximaal gesloten. Dat heeft een jaarlijkse kans van voorkomen van  $f_{gestuwd}$ . Als dit regime wordt gekarakteriseerd met een enkele afvoersituatie  $Q_1$  met een duur  $f_{gestuwd}$ , dan past dit bij de afvoeroverschrijdingskromme als  $Q_1$  bepaald wordt uit  $f(Q_1) = f_{gestuwd}/2$ . Hierin is  $f(Q_1)$  de gemiddelde jaarlijkse kans voor het overschrijden van afvoer  $Q_1$ .

Voor de periode 1990-2020 zijn de stuwen vrijwel gesloten bij afvoeren tot ca 1700 m³/s in de Boven-Rijn en tot ca 50 m³/s in de Boven-Maas. Uit de historische afvoerreeks 1990-2022 volgt  $f_{gestuwd} = 0.388$  voor de Rijn en  $f_{gestuwd} = 0.172$  voor de Maas. Representatieve waarden voor  $Q_1$  met overschrijdingskans  $f_{gestuwd}/2$  zijn dan 1336 m³/s voor de Rijn en 32 m³/s voor de Maas.

##### Regime b) alleen zomerbed gevuld, stuwen in de overgang naar volledig open

In dit regime veranderen de stuwen van maximaal gesloten naar volledig open. De kans van voorkomen van volledig geopende stuwen is gedefinieerd als  $f_{ongestuwd}$ . De kans van voorkomen van de overgang tussen volledige gesloten en volledig geopende stuwen is dan  $1 - (f_{gestuwd} + f_{ongestuwd})$ . Omdat het een overgangsregime betreft met een veranderende afvoersituatie is weergave met één enkele afvoersituatie onvoldoende representatief. Iets passender is het gebruik van twee afvoersituaties:

$$Q_2 \text{ bepaald uit } f(Q_2) = f_{gestuwd} + [1 - f_{ongestuwd} - f_{gestuwd}] / 4$$

$$Q_3 \text{ bepaald uit } f(Q_3) = f_{gestuwd} + 3[1 - f_{ongestuwd} - f_{gestuwd}] / 4$$

Beiden met een relatieve duur  $[1 - f_{ongestuwd} - f_{gestuwd}] / 2$ . Hierin is  $f(Q_2)$  de gemiddelde jaarlijkse kans voor het overschrijden van afvoer  $Q_2$  (en  $f(Q_3)$  de overschrijdingskans van afvoer  $Q_3$ ).

Met de afvoerreeks 1990-2020 is  $f_{ongestuwd}$ , de kans van voorkomen van volledig geopende stuwen  $f_{ongestuwd} = 0.075$  voor de Rijn en  $f_{ongestuwd} = 0.012$  voor de Maas. Daarmee is de jaarfractie van het overgangsregime  $1 - f_{gestuwd} - f_{ongestuwd} = 0.537$  voor de Rijn en 0.815 voor de Maas. De definities van de afvoersituaties leiden dan tot de waarden in Tabel 3.

	$f_{gestuwd}$	$f_{ongestuwd}$	$f(Q_2)$	$f(Q_3)$	duur	$Q_2$ [m³/s]	$Q_3$ [m³/s]
Boven-Rijn	0.388	0.075	0.522	0.791	0.269	1900	2700
Boven-Maas	0.172	0.012	0.376	0.784	0.408	90	340

Tabel 3 Minimum set afvoersituaties regime b.

#### Afvoerregime c ontwikkelende uiterwaardstroming, stuwen volledig geopend

In dit regime zijn stuwen volledig geopend, maar is de stroomvoering in de uiterwaarden nog niet volledig ontwikkeld. De relatieve duur van dit regime is bepaald met  $1 - f_{volledige\ stroomvoering} - (1 - f_{ongestuwd})$ . Hierin is  $f_{volledige\ stroomvoering}$  de relatieve duur van een volledig ontwikkelde stroomvoering in de uiterwaard. De afvoersituatie  $Q_4$  wordt dan bepaald uit  $f(Q_4) = (1 - f_{ongestuwd} + 1 - f_{volledige\ stroomvoering}) / 2$ . Dat wordt hier pragmatisch geschat met

$$\text{Boven-Rijn } f_{volledige\ stroomvoering} = 1 - f(6000 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.014$$

$$\text{Boven-Maas } f_{volledige\ stroomvoering} = 1 - f(2300 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.001$$

Ondanks dat ook dit een overgangsregime betreft waarin de uiterwaardstroming ontwikkeld, is de jaarlijkse duur ervan gemiddeld beperkt. Daarom wordt verondersteld dat een enkele afvoersituatie vooralsnog voldoende is om de jaarlijkse bijdrage van dit regime aan morfodynamiek te karakteriseren.

	$f_{ongestuwd}$	$f_{volledige\ stroomvoering}$	$f(Q_4)$	duur	$Q_4$ [m³/s]
Boven-Rijn	0.075	0.014	0.9556	0.061	4473
Boven-Maas	0.012	0.001	0.9934	0.011	1444

Tabel 4a Minimum set afvoersituaties regime c.

#### Afvoerregime d ontwikkelde uiterwaardstroming, stuwen volledig geopend

In dit regime is de stroomvoering in de uiterwaarden volledig ontwikkeld met een relatieve duur  $f_{volledige\ stroomvoering}$ . De afvoersituatie  $Q_5$  wordt bepaald uit  $f(Q_5) = 1 - f_{volledige\ stroomvoering} / 2$

	$Q_{volledige\ stroomvoering}$	$f_{volledige\ stroomvoering}$	$f(Q_5)$	duur	$Q_5$ [m³/s]
Boven-Maas	6000	0.014	0.993	0.014	6724
Boven-Rijn	2300	0.001	0.999	0.001	2623

Tabel 4b Minimum set afvoersituaties regime d.

De bepaling van representatieve afvoersituaties op basis van de afvoeroverschrijdingskromme kan worden samengevat met Tabel 5.

Regime	afvoersituatie (Boven-Rijn [m³/s])	relatieve duur [-]
a) alleen zomerbed gevuld, stuwen vrijwel gesloten	1336	0.388
b) alleen zomerbed gevuld, stuwen in overgang naar volledig open	1900 2700	0.269 0.269

Regime	afvoersituatie (Boven-Rijn [ $\text{m}^3/\text{s}$ ])	relatieve duur [-]
c) ontwikkelende uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	4473	0.061
d) ontwikkelde uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	6724	0.014

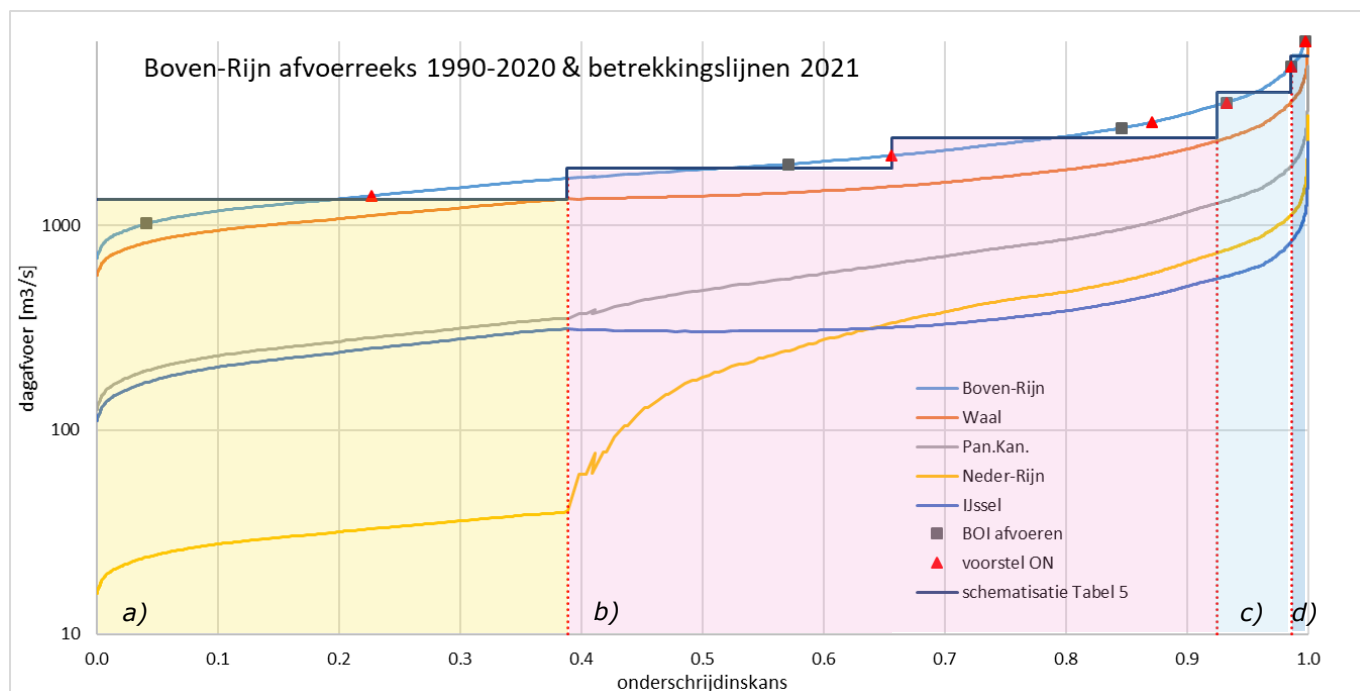
Regime	afvoersituatie (Boven-Maas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ])	relatieve duur [-]
a) alleen zomerbed gevuld, stuwen vrijwel gesloten	32	0.086
b) alleen zomerbed gevuld, stuwen in overgang naar volledig open	90	0.408
	340	0.408
c) ontwikkelende uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	1444	0.011
d) ontwikkelde uiterwaardstroming stuwen volledig geopend	2623	0.001

Tabel 5 Karakterisering regimes met minimum set afvoersituaties.

### 5 Vergelijking BOI afvoeren met minimaal benodigde set afvoersituaties

Het resultaat van Tabel 5 is weergegeven in Fig.2 voor de Rijn en Fig.3 voor de Maas.

In Fig.2 zijn behalve het verloop van karakteristieke afvoeren ook de set afvoeren die vanuit BOI beschikbaar is en het voorstel van RWS-ON weergegeven. Het grootste verschil tussen beide is de laagste afvoerwaarde. In Fig.2 is te zien dat de laagste waarde uit de BOI set te laag is om het eerste blok te karakteriseren. Nu is in gestuwde delen van de Nederrijn de morfodynamiek in a) en een groot deel van b) door de lage stroomsnelheden redelijk beperkt, daar zou een minder representatieve afvoersituatie wellicht minder hinderen. Maar dat geldt niet voor de andere takken, daar schiet de reeks die beschikbaar is uit BOI tekort. Voor hogere waarden is het onderscheid tussen de BOI reeks en het RWS ON voorstel minder groot en met beiden kunnen de blokken voldoende gekarakteriseerd worden. Met andere woorden, als de laagste waarde uit het ON voorstel aan de BOI afvoerreeks wordt toegevoegd, dan zijn alle blokken met die reeks voldoende te karakteriseren.

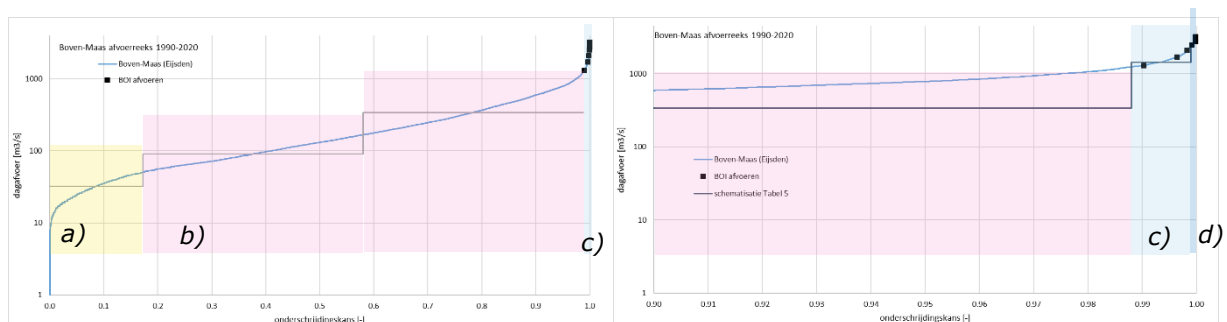


Figuur 2 Afvoerblokken per regime voor de Rijn.

In Fig.3 zijn de karakteristieke afvoerblokken weergegeven die de regimes voor de Maas karakteriseren. Behalve deze afvoerblokken zijn ook de uit BOI beschikbare afvoeren geplot. Deze

BOI afvoerwaarden komen alleen overeen met de blokken Q<sub>4</sub> en Q<sub>5</sub>. Voor lagere afvoeren zijn in de BOI reeks geen waarden beschikbaar. Nu draagt stroming in de regimes met lagere afvoer niet vergelijkbaar bij aan de morfodynamiek; in de gestuwde trajecten van de Maas zelf blijven snelheden gedurende a) en b) beperkt en kan de meeste morfodynamiek ontwikkelen tijdens c en d. Hoewel grofweg vanaf 200 m<sup>3</sup>/s sediment in beweging begint te komen zal ook in de grovere grindbodem van de ongestuwde delen van de Maas de meeste mobiliteit vooral goed ontwikkelen in de regimes c) en d).

Fig.3 laat zien dat voor het karakteriseren van de regimes c) en d) er meer dan genoeg afvoeren uit de BOI reeks beschikbaar zijn. Deze behoeven zelfs niet allen te worden gebruikt. Om met name het hogere deel van regime b), waarin een grotere delen van het bed mobiel kunnen zijn, te karakteriseren is ten opzichte van de BOI reeks een extra afvoer nodig in de orde van 750 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 3 Afvoerblokken per regime voor de Maas.

## 6 Conclusies DFAST MI

De Rijn en de Maas kennen vier afvoerregimes die voor de bepaling van morfologische effecten onderscheiden kunnen worden.

### Rijntakken

Het karakteriseren van de vier afvoerregimes vergt voor de Rijntakken vijf afvoersituaties. Om de maatvoering van vooral ingrepen voor hogere afvoeren beter te ondervangen kan dit worden uitgebreid tot zes afvoerniveaus. Hoewel een aantal van acht optimaal lijkt vanuit consistentie met andere modellen, wordt dit aantal van zes afvoerniveaus als praktisch uitgangspunt gebruikt. Deze zes afvoerniveaus kunnen worden gebaseerd op de afvoerwaarden uit de BOI reeks, als deze worden aangevuld met een afvoer van circa 1400 m<sup>3</sup>/s. Dat brengt de set op de afvoersituaties die horen bij 1400; 2000; 3000; 4000, 6000 en 8000 m<sup>3</sup>/s (Boven-Rijnafvoer).

### Maas

Voor de Maas zijn de hoogwaterregimes c en d, en het deel van b) met hogere afvoeren relevant voor de morfodynamiek. Dat komt overeen met drie afvoersituaties. Om de maatvoering van vooral ingrepen voor hogere afvoeren beter te ondervangen, en om de eventuele invloed van zeer extreme afvoeren mee te kunnen nemen, kan dit worden uitgebreid tot zes afvoerniveaus. Deze niveau's kunnen worden gebaseerd op de reeks afvoeren van de BOI reeks, als deze wordt aangevuld met een waarde van circa 750 m<sup>3</sup>/s. Dat brengt de set op de afvoersituaties die horen bij 750; 1300; 1700; 2100; 2500 en 3200 m<sup>3</sup>/s (Boven-Maasafvoer).

## 7) Afvoeren in DFAST-BE

DFAST-BE is een hulpmiddel om een inschatting te maken van het jaarlijks erosievolume van dynamische oevers en het uiteindelijk evenwichtsprofiel dat volgens de huidige stand van de kennis wordt verwacht. Afvoeren zijn in DFAST-BE relevant voor het definiëren van de oeverlijn en voor het bepalen van de hydraulische belasting op de oever. Als voorbeeld daarvan wordt in de manual voor de Maas en Rijntakken gegeven:

Dicharge level nr.	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	1998-2002 (wet)	2004-2010 (dry)	2008-2011 (intermediate)
1	75	0.2932	0.1808	0.3110
2	150	0.1918	0.2466	0.2329
3	272	0.1918	0.2603	0.2055
4	400	0.0411	0.0548	0.0685
5	500	0.1507	0.1370	0.0959
6	750	0.0548	0.0712	0.0548
7	900	0.0329	0.0384	0.0164
8	1100	0.0164	0.0082	0.0055
9	1300	0.0137	0.0014	0.0021
10	1500	0.0041	0.0014	0.0021
11	1700	0.0041	0.0000	0.0021
12	1900	0.0041	0.0000	0.0021
13	2300	0.0014	0.0000	0.0014

**Table 3.1:** Probabilities of a discharge level for different scenarios (De Vries, 2012)

Dicharge level nr.	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	average	16% undershot (wet)	50% undershot (intermediate)	84% undershot (dry)
1	1020	0.062	0.000	0.022	0.135
2	1203	0.160	0.066	0.193	0.245
3	1635	0.115	0.101	0.121	0.151
4	2250	0.200	0.154	0.238	0.189
5	3053	0.253	0.326	0.258	0.170
6	3824	0.116	0.179	0.086	0.063
7	4717	0.058	0.094	0.046	0.042
8	6151	0.027	0.061	0.026	0.006
9	8592	0.010	0.020	0.010	0.000

**Table 3.2:** Probabilities of discharge level in the Boven-Rijn (1989-2016) for different scenarios

### Definitie oeverlijn

In DFAST-BE worden in het numeriek riviermodel de oeverlijn gedefinieerd met de roostercellen met een land-waterovergang (diepte=0 m) bij een referentie waterstand. Deze referentie-waterstand hoort bij een referentie-afvoer. Het betreft een situatie waarbij de land-waterovergang bijvoorbeeld op een jaargemiddelde ligt, de jaargemiddelde afvoerwaarde lijkt daarvoor een goede pragmatische keuze.

De hoogte en ligging van deze oeverlijn is vooral bepalend voor het evenwichtsprofiel dat met DFAST-BE wordt voorspeld.

### Hydraulische belasting

Er worden voor het voorspellen van erosie in DFAST-BE twee typen belasting beschouwd;

- i) erosie door schuifspanningen van golven op de oever als gevolg van passerende schepen
- ii) erosie door schuifspanningen door rivierstroming over en langs de oever

#### Ad i) Erosie door golven

Het invloedgebied van scheepsgolven is in DFAST-BE gedefinieerd als de zone tussen een halve karakteristieke golfhoogte boven de hoogte van de oeverlijn en tweemaal de karakteristieke golfhoogte onder de hoogte van de oeverlijn. De frequentie van voorkomen van waterstanden in dit invloedgebied bepaalt de duur van optreden van oevererosie door scheepsgolven.

Omdat de oever is gedefinieerd als de land-water overgang bij referentie-waterstand, is in DFAST-BE oevererosie door scheepvaartgolven dus beperkt tot situaties met waterstanden tot een halve karakteristieke golfhoogte daarboven en tweemaal de karakteristieke golfhoogte daaronder. Ook de karakteristieke golfhoogte zelf varieert met de waterdiepte (hoe dieper, des te kleiner) en is daarmee plaats- en afvoerafhankelijk. Deze belasting wordt in DFAST-BE minstens met de situatie met referentie-afvoer meegenomen, maar om de frequentie daarvan goed af te bakenen zijn afvoeren in een bandbreedte rondom deze referentieafvoer nodig.

Ad ii) Erosie door stroming

De grootte van het tweede type oever erosie varieert met de grootte (kwadratisch) en duur (lineair) van de stroomsnelheid ter plekke van de oever. Dit betekent dat vooral afvoeren boven de referentie-afvoer nodig zijn om de grootte en duur van stroomsnelheden ter plekke van de oever te kunnen beschouwen. Ook deze belasting is plaats- en afvoerafhankelijk.

## **8) Voorstel afvoerniveau's DFAST-BE**

In de DFAST-BE handleiding wordt geadviseerd om met voldoende afvoerniveau's te starten die de hele hydrograaf discretizeren, zie de voorbeelden in de manual van achtereenvolgens 13 afvoeren voor de Maas en 9 voor de Rijntakken.

Tot deze afvoerniveau's behoort een afvoerwaarde met een land-water lijn die de oeverlijn karakteriseert. In afgelopen jaren was dat de eerste afvoerwaarde die in de reeks werd aangeboden (zie de twee voorbeelden uit de DFAST-BE manual hieronder). Omdat het een goede weergave van de meest frequente golfbelastingen betreft, ligt een 50% waarde voor de hand als referentie afvoer. Voor een (willekeurige) reeks 1990-2020 van Boven-Rijn afvoeren is dit 1877 m<sup>3</sup>/s en voor de Boven-Maas 131 m<sup>3</sup>/s. Dat kan worden afgerond naar achtereenvolgens 2000 m<sup>3</sup>/s en 130 m<sup>3</sup>/s.

Voorgesteld wordt voor de set voor de Rijntakken te gebruiken de afvoersituaties die horen bij 1020; 1400; 2000; 3000; 4000, 6000 en 8000 m<sup>3</sup>/s (Boven-Rijnafvoer) met 2000 als referentieafvoer voor de bepaling van oeverlijnen.

Idem voor de Maas wordt voorgesteld 80; 130; 300; 750; 1300; 1700; 2100; 2500 m<sup>3</sup>/s (Boven-Maasafvoer) met 130 m<sup>3</sup>/s als referentieafvoer voor bepaling van oeverlijnen.



## 9) Afleiding kentallen voortplantingssnelheden

Een relevante calibratiefactor in DFAST-MI is de afvoerafhankelijke morfologische tijdschaal. Omdat toepassing van DFAST-MI in veel planstudies functioneert als eerste indicatie van morfologische effecten, al of niet vooruitlopend op completer studie met een numeriek 2DH model voor morfologie, is voor consistentie in planstudies, DFAST-MI idealiter ook geverifieerd op het numeriek model. Ofwel, de morfologische tijdschaal in DFAST-MI wordt zodanig gekozen dat DFAST dynamiek van effecten uit het morfologisch model nabootst. WAQMORF is op die manier ook geverifieerd met het DELFT3D model van de Rijntakken.

Omdat zo'n numeriek model er in DHYDRO nog niet is, is voorlopig de set van het geverifieerde WAQMORF nog het uitgangspunt. Deze sectie beschrijft hoe een set kan worden afgeleid voor de bij DFAST-MI beoogde aanpak met meer afvoeren.

De morfologische tijdschaal is arbitrair gedefinieerd als  $T_{mi} = 2B_{hoofdgeul}/w_i$ . Daarbij is een jaargemiddelde voortplantingssnelheid  $\bar{w}$  uit peilingen beschikbaar.

De toedeling van de morfologische tijdschaal over meerdere afvoerafhankelijkheid is als volgt mogelijk. De jaarlijkse verplaatsing van bodemveranderingen kan worden geschreven als

$$\bar{w}T = T \sum p(Q)w_Q$$

met  $T$  [jaar]

$\bar{w}$  [m/jaar] de jaargemiddelde verplaatsingssnelheid

$w_Q$  [m/jaar] de verplaatsingssnelheid bij een afvoer  $Q$

$p(Q)$  [-] de kans van voorkomen van afvoer  $Q$

Een theoretische formulering voor de verplaatsingssnelheid is  $w = b \frac{s}{a}$  met  $a$  [m] de waterdiepte en het sedimenttransport  $s = mu^b$  met  $u$  [m/s] de stroomsnelheid en  $m$  en  $b$  coëfficiënten van de transportformule.

Dat betekent dat  $w_Q = bm \frac{[u(Q)]^b}{a(Q)}$  en  $\bar{w} = \sum mb p(Q) \frac{[u(Q)]^b}{a(Q)}$ . Als ter wille van eenvoud  $m$  en  $b$  onafhankelijk van de afvoer worden aangenomen kan door eliminatie van  $m$  uiteindelijk worden gevonden  $w(Q) = \bar{w} \frac{[u(Q)]^b}{a(Q)} \left( \sum p(Q) \frac{[u(Q)]^b}{a(Q)} \right)^{-1}$

Om consistentie bij toepassing te borgen worden voor  $\bar{w}$  de waarden uit WAQMORF gebruikt die zijn afgeleid uit de toenmalige bodempeilingen (zie de tabellen 6,7 en 8) en wordt voor  $p(Q)$  de kans van voorkomen gebruikt volgens de toenmalige verdelingen

$$\text{Boven-Rijn afvoer} \quad T_{overschrijdingsperiode} = 365e^{\left(\frac{800-Q_{\text{Boven-Rijn}}}{1280}\right)}$$

$$\text{Maas afvoer} \quad T_{overschrijdingsperiode} = 365e^{\left(\frac{-Q_{\text{Borgharen}}}{300}\right)}$$

Om  $w(Q)$  voor elk relevant afvoerniveau te kunnen uitrekenen zijn modelwaarden van  $u$  [m/s] en  $a$  [m] gebruikt, die met  $b=5$ , per 100 m zomerbed, voor verschillende afvoeren zijn berekend. Deze waarden voor  $w(Q)$  zijn vervolgens geïnterpoleerd naar de DFAST-MI afvoerwaarden en tenslotte gemiddeld over het bijbehorende riviertraject. Door de interpolaties kan de jaarsom van eindresultaten een beetje afwijken van de beoogde jaargemiddelde verplaatsingssnelheid.

traject	km-raai	$\bar{W}$ [km/jaar]	w(Q) [km/jaar]					
			Boven-Rijn afvoer [m³/s]					
		1974-1999	1300	2000	3000	4000	6000	8000
Bovenrijn	859-867	1,12	0.42	0.98	1.86	2.63	4.79	8.76
Boven-Waal	868-886	1,04	0.63	0.97	1.51	2.06	3.16	5.35
Midden-Waal	887-915	1,13	0.85	1.12	1.43	1.78	2.93	3.83
Beneden-Waal	916-951	1,10	0.47	0.94	1.70	2.70	5.04	6.86
BovenMerwede	951-961	1.08	0.06	0.31	1.21	3.72	11.66	20.51
Pannerdensch Kanaal	868-879	0,97	0.03	0.56	2.10	3.15	5.79	9.99
Nederrijn, stuwpand Driel	880-891	0,77	0.00	0.21	2.17	3.03	3.13	3.59
Nederrijn, stuwpand Amerongen	892-922	1,17	0.79	1.14	1.61	1.99	2.61	3.04
Lek, stuwpand Hagestein	923-947	1,03	0.41	0.90	1.93	3.09	4.56	6.00
Lek *)	948-989	0,96	0.00	0.05	0.85	2.54	11.68	30.62
Boven-IJssel	880-930	1,50	1.23	1.59	1.98	2.37	3.40	3.89
Midden-IJssel	931-970	1,16	0.74	1.18	1.86	2.58	3.50	3.26
Beneden-IJssel	970-1000	1,06	0.26	0.56	1.38	3.12	8.78	18.67

traject	km-raai	$\bar{W}$ [km/jaar]	w(Q) [km/jaar]					
			Maas afvoer [m³/s]					
		1950-1995	750	1300	1700	2100	2500	3200
Grensmaas	16-69	0.001	0.003	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Linne-Roermond	69-80	0.14	0.58	1.26	1.02	0.75	0.23	0.09
Roermond-Belfeld	81-100	0.26	1.13	2.74	2.13	1.72	1.95	2.22
Belfeld-Sambeek	101-146	0.26	0.95	3.62	3.70	4.04	4.52	5.74
Sambeek-Grave	147-175	0.11	0.29	2.13	2.61	2.59	2.46	2.82
Grave-Lith	176-200	0.28	0.60	5.40	5.98	5.50	5.53	6.34
Lith-Ammerzoden	201-277	0.14	0.40	1.88	2.26	1.83	2.16	2.54
Ammerzoden-Keizersveer**)	278-247	0.14*	0.32	2.44	4.14	4.85	5.96	8.62

Tabel 6 Voorstel verplaatsingssnelheden per afvoerniveau.

\*) Zonder invloed van riviergetij

\*\*) Geen waarde beschikbaar uit peilingen; gelijk aan traject Lith-Ammerzoden aangenomen

Gebaseerd op snelheden en diepten uit een verouderd model  
 Gebaseerd op snelheden en diepten uit huidige schematisering DHydro

Tabel 6 is vanwege consistentie in de toepassing gebaseerd op kentallen zoals ook zijn gebruikt in WAQMORF. Als er geverifieerde morfologische modellen beschikbaar komen van Rijntakken en Maas, is het mogelijk om met deze geverifieerde modellen Tabel 6 te actualiseren en DFAST MI met deze modellen, opnieuw ten behoeve van consistentie te verifiëren.

## Bijlage A oude kentallen WAQMORF

Uit de RWS memo *Methodiek inschatting morfologische effecten in het zomerbed door lokale rivieringrepen* UPDATE December 2011

traject	km-raai	voortplantingssnelheid [km/jaar]	
		1950-1973	1974-1999
Bovenrijn	859-867	0,97	1,12
Boven-Waal	868-886	0,98	1,04
Midden-Waal	887-915	1,09	1,13
Beneden-Waal	916-951	1,15	1,10
Pannerdensch Kanaal	868-879	0,79	0,97
Nederrijn, stuwpand Driel	880-891	0,97	0,77
Nederrijn, stuwpand Amerongen	892-922	1,36	1,17
Lek, stuwpand Hagestein	923-947	1,16	1,03
Lek	948-989	1,12	0,96
Boven-IJssel	880-930	1,61	1,50
Midden-IJssel	931-970	1,28	1,16
Beneden-IJssel	970-1000	0,94	1,06

**Tabel 6** Overzicht gemiddelde voortplantingssnelheden (gebaseerd op km-gemiddelde bodemliggingen en inclusief de invloed van baggeren) RIZA werkdok 2005.044x.

Traject	Km-raai	voortplantingssnelheid [km/jaar]	
		voor 1950	na 1950
Grensmaas (km 16-69)	16-69	0,001	0,001
Linne-Roermond (km 69-80)	69-80	0,26	0,14
Roermond-Belfeld (km 81-100)	81-100	0,23	0,26
Belfeld Sambeek (km 101-146)	101-146	0,28	0,26
Sambeek-Grave (km 147-175)	147-175	0,37	0,11
Grave-Lith (km 176-200)	176-200	1,99	0,28
Lith-Ammerzoden (km 201-227)	201-227	0,76	0,14

**Tabel 7** Overzicht trajectgemiddelde voortplantingssnelheden (gebaseerd op km-gemiddelde bodemliggingen en inclusief de invloed van baggeren) WD rapport *Kennis en instrumenten Maas morfologie Inventarisatie behoefte monitoring en voorspelgereedschap*)

Traject	Km	Voortplantingssnelheid [km/a]
Beneden Waal& Boven Merwede	934-961	1,08
Beneden Merwede	962-977	0,75
Nieuwe Merwede	962-980	0,84

**Tabel 8** Overzicht trajectgemiddelde voortplantingssnelheden (gebaseerd op km-gemiddelde bodemliggingen uit de periode 1975-2000 inclusief de invloed van baggeren) RIZA WSR memo 2007-013 calibratie parameters Merwede.