

# ECOLOGISCHE SLEUTELFACTOREN STROMENDE WATEREN

⇒ **TUSSENRAPPORTAGE  
HYDROLOGIE EN  
MORFOLOGIE**



2018  
57

**stowa**

# **ECOLOGISCHE SLEUTELFACTOREN STROMENDE WATEREN**

**⇒ TUSSENRAPPORTAGE  
HYDROLOGIE EN  
MORFOLOGIE**



**2018  
57**





---

# INHOUDSOPGAVE

---

<b>H1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>6</b>
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
1.3	Afbakening	8
1.4	Uitwerkingsniveaus en diepgang	9
1.5	Leeswijzer	10
<b>H2</b>	<b>HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE</b>	<b>12</b>
2.1	Parameters en processen	13
2.2	Ecologische sleutelfactoren	21
<b>H3</b>	<b>METHODEN VOOR HET BEPALEN VAN DE HYDROMORFOLOGISCHE TOESTAND</b>	<b>24</b>
3.1	Hydromorfologie in de KRW	25
3.2	Bestaande methoden	26
3.3	Evaluatie van de methoden	34
<b>H4</b>	<b>QUICKSCAN</b>	<b>37</b>
4.1	Verzamelen van bestaande, gemakkelijk te verkrijgen informatie	38
4.2	Startbijeenkomst en oriënterend veldbezoek	24
4.3	Eerste globale idee over de hydrologie en morfologie	42
4.4	Evaluatie	49
<b>H5</b>	<b>GLOBALE ANALYSE</b>	<b>50</b>
5.1	Afvoerdynamiek (ESFr-Afvoerdynamiek) en Grondwater (ESFr-Grondwater)	51
5.2	Stagnatie (ESFr-Stagnatie) en Waterplanten (ESFr-Waterplanten)	59
5.3	Natte doorsnede (ESFr-Natte doorsnede)	62
<b>H6</b>	<b>NADERE ANALYSE</b>	<b>70</b>
6.1	Analyse van de afvoerdynamiek	71
6.2	Analyse van de morfodynamiek	78

---



---

---

<b>H7</b>	<b>ACHTERGROND</b>	<b>90</b>
7.1	Systeemkenmerken met betrekking tot de afvoer	91
7.2	Afvoer	97
7.3	Verhang	102
7.4	Beddingdimensies (dwarsprofiel en lengteprofiel)	105
7.5	Weerstand en relatie met plantengroei	113
7.6	Stroomsnelheid	117
7.7	Sedimenttransport	123
<b>H8</b>	<b>DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN</b>	<b>136</b>
8.1	Discussie	137
8.2	Aanbevelingen	146
<b>H9</b>	<b>VERANTWOORDING</b>	<b>150</b>
9.1	Literatuuronderzoek	151
9.2	Interviews	152
9.3	Relatieschema	152
9.4	Casestudies	153
9.5	Methodebeschrijving en achtergrondinformatie	154
<b>H10</b>	<b>LITERATUUR</b>	<b>156</b>
	Bijlage A: Milieufactoren en het voorkomen van soort(groep)en	164
	Bijlage B: Benodigde gegevens hydrologie en morfologie	168
	Bijlage C: Tools voor het opstellen van een waterbalans	171
	Bijlage D: Resultaat interviews	178
	<b>STOWA IN HET KORT</b>	<b>189</b>
	<b>COLOFON</b>	<b>191</b>

---

---

.....

---

# H1 INLEIDING



---

## 1.1 AANLEIDING

De afgelopen jaren is er steeds meer aandacht voor systeembegrip als basis onder het stellen van doelen en het nemen van maatregelen in het watersysteem. Voor de waterkwaliteit en ecologie werkt de STOWA aan de ontwikkeling van 'ecologische sleutelfactoren' als handvat voor het maken van (ecologische) watersysteemanalyses. Ze geven een antwoord op de vragen: 'waarom is het zoals het is?' en 'wat moeten we doen om verbetering te bewerkstelligen?'. Ze vormen zo een goede aanvulling op de kennis en methoden die er zijn om de ecologische toestand in beeld te brengen.

De methodiek van ecologische sleutelfactoren is relevant voor alle typen oppervlaktewater. In 2014 heeft de STOWA de methodiek van 'ecologische sleutelfactoren' geïntroduceerd voor de stilstaande wateren en de 'stromende wateren die stilstaan' (STOWA, 2014). In 2015 is een voorstel gedaan voor de sleutelfactoren voor stromende wateren (STOWA, 2015-W06).

In 2016 is de STOWA gestart met de verdere uitwerking en ontwikkeling van de ecologische sleutelfactoren voor stromende wateren. Hiervoor zijn de sleutelfactoren in 2017 ondergebracht in een viertal werkpakketten: hydrologie en morfologie, bufferzone en waterplanten, belasting en connectiviteit.

In dit document wordt uitwerking gegeven aan de ecologische sleutelfactoren (ESF-en) die met de hydrologie en morfologie samenhangen, ofwel het transport van water en sediment. Het gaat om de volgende sleutelfactoren: ESFr-Afvoerdynamiek, ESFr-Grondwater, ESFr-Natte doorsnede, ESFr-Waterplanten (aspect weerstand) en ESFr-Stagnatie.

## 1.2 DOEL

Het doel van de uitwerking hydrologie en morfologie is het ontwikkelen van een methodiek voor de analyse van het hydrologische en morfologische functioneren van stromende wateren.

---

De methodiek moet aan een aantal belangrijke kenmerken voldoen. De methodiek:

- Is primair bedoeld voor ecologen en hydrologen van waterschappen, inclusief adviseurs van kennisinstituten en adviesbureaus.
- Is eenduidig, kort, bondig en in begrijpelijke taal geschreven voor deze doelgroep.
- Nodigt uit tot systeemdenken en de beantwoording van de vraag welke processen zich in het watersysteem afspelen en hoe die de toestand beïnvloeden.
- Is bedoeld als ondersteuning bij 1) het opstellen van doelen en maatregelen en 2) het uitwerken van een inrichtingsplan voor een locatie, traject of (deel) stroomgebied.
- Maakt gebruik van (cq. bouwt voort op) de bestaande methodieken en handboeken.
- Sluit zo goed mogelijk aan op de beschikbare kennis vanuit de wetenschap.
- Maakt een duidelijk onderscheid tussen oorzaak en gevolg (ook wel voorwaarden en toestand). De basis voor de watersysteemanalyse is wat je ziet/waarneemt in het veld overeenkomt met je verwachting op basis van een analyse van de oorzaken/voorwaarden.
- Wordt ontwikkeld in samenwerking/ samenhang met de uitwerking van de overige werkpakketten: 'bufferzone en waterplanten' (STOWA, 2018-28), 'belasting' (STOWA, 2018-30) en 'connectiviteit' (STOWA, 2018-29).
- Is bruikbaar op verschillende schaalniveaus (stroomgebied en traject).
- Wordt op drie niveaus uitgewerkt: quickscan, globale analyse, nadere analyse.
- Houdt rekening met een (vaak) beperkte informatiedichtheid.

### 1.3 AFBAKENING

Bij de ontwikkeling van de methodiek is de volgende afbakening gehanteerd:

- Er worden geen nieuwe kennis, methodieken en tools ontwikkeld. Wel worden de bestaande kennis, methodieken en tools beter uitgewerkt en ontsloten.
- De groei van planten wordt alleen meegenomen als ruwheidsfactor (kM). De ontwikkeling van (het soort en type) planten als gevolg van licht (oeverplanten, troebelheid en waterdiepte), stroming, sedimentsamenstelling, nutriënten en onderhoud wordt niet in beschouwing genomen in deze uitwerking. Zie voor deze aspecten de uitwerking bufferzone en waterplanten (STOWA, 2018-28).
- Gezien de beperkte beschikbare tijd wordt de uitwerking primair gericht op het uitwerkingsniveau van de quickscan en globale analyse. Geschikte metho-

---

dieken en tools ten behoeve van de nadere analyse worden globaal beschreven voor zover ze beschikbaar zijn.

- In stromende wateren kunnen in de breedterichting verschillende zones worden onderscheiden. In deze zones zijn verschillende hydrodynamische parameters van belang voor de toestand:
  - Bedding - stroming/ waterpeil/ waterdiepte
  - Oeverzone (zone tussen laag en hoog water) - waterpeilfluctuatie
  - Overstromingsvlakte (overstroomt bij piekafvoeren) - overstromingsfrequentie en overstromingsduur

Om de complexiteit te beperken, is in dit document alleen de hydrologie en morfologie van de bedding uitgewerkt.

- Daarnaast kunnen stromende wateren worden ingedeeld in verschillende watertypen (KRW: R-typen). In enkele typen spelen hele specifieke processen een rol, zoals droogval (in bovenloopjes) en extreme waterpeilfluctuaties en beïnvloeding van de sedimentstromen in grote rivieren. Om de complexiteit te beperken, is de uitwerking in eerste instantie gericht op de meest voorkomende, m.n. R4, R5 en R6 (permanent stromende boven-, midden- en benedenlopen op zand en klei). Hierbij is wel zoveel mogelijk rekening gehouden met (processen in) andere watertypen.

#### 1.4 UITWERKINGSNIVEAUS EN DIEPGANG

De hydrologie en morfologie van stromende wateren kan op verschillende uitwerkingsniveaus geanalyseerd worden. Er worden drie uitwerkingsniveaus onderscheiden:

- Quicksan: een snelle analyse om te verkennen of de hydrologie en morfologie mogelijk een probleem vormen voor de ecologische toestand ('staat het stoplicht op rood of op groen?').
- Globale analyse: een globale analyse waarom de hydrologie en morfologie een probleem vormen voor de ecologische toestand ('waarom staat het stoplicht op rood?').
- Nadere analyse: een gedetailleerde analyse van de hydrologie en morfologie voor een goed begrip van het functioneren van het watersysteem, bijvoorbeeld om het effect van (hydrologische en morfologische) maatregelen in te kunnen schatten.

Voor elk uitwerkingsniveau is bovendien een bepaalde diepgang van informatie



---

nodig: de analyse kan kwalitatief zijn, kwantitatief of deels kwalitatief/kwantitatief. In de quickscan ligt de focus op direct beschikbare, m.n. kwalitatieve informatie over het functioneren van het stroomgebied. Daarnaast wordt zo veel mogelijk kwantitatieve informatie verzameld over de milieufactoren die direct van invloed zijn op aquatische organismen: de stroomsnelheid, het waterpeil en het bodemsubstraat. De globale analyse is gericht op de belangrijkste factoren die de stroomsnelheid, het waterpeil en de vorming van het bodemsubstraat beïnvloeden; deze analyse is kwantitatief. In de nadere analyse worden de afvoer- en morfodynamiek meer diepgaand geanalyseerd. In deze analyse wordt specifiek gekeken naar tendensen in erosie en sedimentatie (sedimenttransport) als basis voor het ontstaan van een stabiel en gevarieerd bodemsubstraat.

## 1.5 LEESWIJZER

Dit rapport start met een beschouwing op de belangrijkste parameters en processen die relevant zijn voor de beschrijving van de hydrologie en morfologie in stromende wateren (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk wordt een samenhangend relatie-schema gepresenteerd dat laat zien hoe deze parameters en processen met elkaar samenhangen. In § 2.2 wordt getoond hoe het relatieschema zich verhoudt tot de ecologische sleutelfactoren voor stromende wateren (STOWA, 2015-W06).

In de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn naast fysisch-chemische ook hydromorfologische kwaliteitselementen benoemd 'die mede bepalend zijn voor de biologische elementen' (EG, 2000). In hoofdstuk 3 wordt hier kort bij stilgestaan. Daarnaast worden de belangrijkste beschikbare methoden voor het beschrijven van de hydromorfologische toestand besproken en met elkaar vergeleken.

In hoofdstuk 4 tot en met 6 is toegelicht hoe de ecologische sleutelfactoren voor hydrologie en morfologie geanalyseerd moeten worden op het niveau van de quickscan (hoofdstuk 4), globale analyse (hoofdstuk 5) en nadere analyse (hoofdstuk 6). Om de methodebeschrijving praktisch en overzichtelijk te houden, is de benodigde achtergrondinformatie los gehouden van de methodebeschrijving. De achtergrondinformatie is opgenomen in hoofdstuk 7.

Het rapport besluit met een discussie en aanbevelingen met betrekking tot de gepresenteerde analysewijze en de ecologische sleutelfactoren (hoofdstuk 8). Hoofdstuk 9 bevat een (korte) verantwoording voor de werkwijze die is gevolgd bij

---

de totstandkoming van dit rapport. De literatuurverwijzingen ten slotte zijn opgenomen in [hoofdstuk 10](#).

---

## H2 HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE



---

Als basis voor de uitwerking hydrologie en morfologie zijn de relevante milieufactoren benoemd en de belangrijkste parameters en processen met elkaar in verband gebracht in § 2.1. In § 2.2 zijn deze parameters en processen gerelateerd aan de ecologische sleutelfactoren.

## 2.1 PARAMETERS EN PROCESSEN

### Relevante milieufactoren

Het voorkomen van aquatische organismen wordt gestuurd door een beperkt aantal milieufactoren (STOWA, 2015). Met milieufactoren worden die factoren bedoeld, die direct van invloed zijn op (het functioneren van) aquatische organismen. In STOWA (2015) worden een negental factoren onderscheiden; Verdonschot (2015) onderscheidt meer milieufactoren, zie [bijlage A](#). De meest relevante milieufactoren voor de beschrijving van de hydrologie en morfologie zijn ‘stroming’, ‘waterdiepte/ droogval’ en ‘bodemsubstraat’.

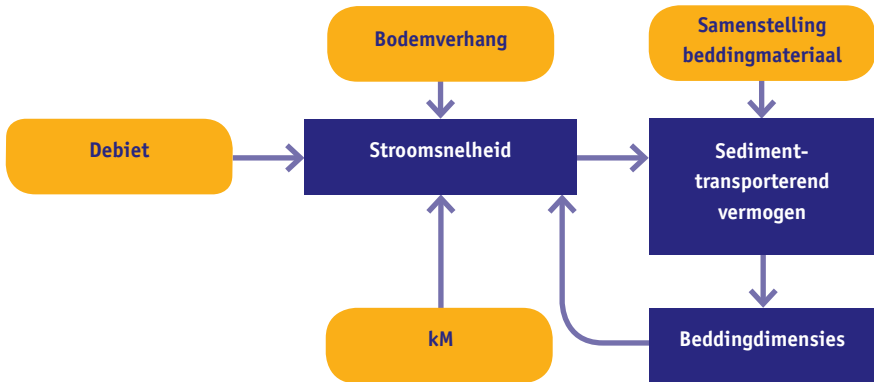
### Basisrelaties

Een stromend watersysteem is te beschouwen als een zogenaamd complex open proces-respons systeem (Wolfert, 1991). In ‘gewoon’ Nederlands betekent dit een systeem dat voortdurend aan veranderingen onderhevig is en zich daaraan telkens probeert aan te passen. Daarbij streeft het naar een zeker evenwicht. In dit systeem beïnvloeden de factoren elkaar en is sprake van een groot aantal terugkoppelingsmechanismen. Dit maakt het lastig om de werking van het watersysteem te begrijpen en de oorzaken en gevolgen te onderscheiden.

In de figuren in dit hoofdstuk worden de belangrijkste factoren en onderlinge relaties weergegeven. De figuur is gebaseerd op het zogenaamde 5S-model van Beken stromen (Verdonschot, 1995) en het model van Ashworth en Ferguson (1986), die verder zijn vereenvoudigd (Laseroms, 1996). Deze figuur is als uitgangspunt genomen voor de uitwerking hydrologie en morfologie (zie [figuur 2.1](#)).

In het algemeen kan men stellen dat de afvoer, het verhang, de beddingdimensies en de weerstand (kM) de stroomsnelheid bepalen en dat de stroomsnelheid en de samenstelling van het beddingmateriaal het sedimenttransport bepalen. Dit is op zijn beurt weer van invloed op de beddingdimensies en daarmee weer op de stroomsnelheid (terugkoppelingsmechanisme).

**FIG 2.1 BELANGRIJKSTE FACTOREN EN RELATIES VOOR DE HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE VAN STROMENDE WATEREN (LASEROMS, 1996)**



### Stroming en waterpeil

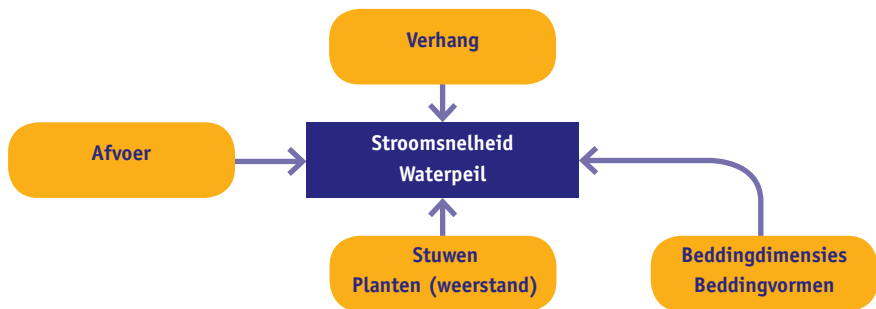
De stroomsnelheid ontstaat als gevolg van een viertal factoren: de afvoer, het verhang, de beddingdimensies (dwarsprofiel) en de weerstand, zie figuur 2.2. In deze figuur is het gevolg (de stroomsnelheid) weergegeven met een blauw blokje en zijn de oorzaken weergegeven met gele ovals.

De afvoer is de totale hoeveelheid water die per tijdseenheid over het geul- en dalbodemoppervlak wordt getransporteerd. De afvoer (of het debiet) wordt uitgedrukt in  $m^3/s$  (ook wel liters/s). De afvoer van een stroomgebied wordt bepaald door een groot aantal kenmerken van het stroomgebied en wordt apart besproken (zie onder 'afvoer'). Het verhang is de helling van het bodemoppervlak en wordt meestal uitgedrukt in  $m/km$ . Met de beddingdimensies wordt het dwarsprofiel bedoeld: de breedte en de diepte. In deze uitwerking ligt de focus bij de bedding ('van insteek tot insteek'), zie § 1.3. Voor de analyse van de (processen in) de overstromingsvlakte moet het dwarsprofiel van het hele dal in beschouwing worden genomen (tot waar het water uit de waterloop terecht kan komen). De weerstand tenslotte is de weerstand die de waterloop biedt aan de stroming. Deze wordt in de regel vooral bepaald door de aanwezigheid van barrières (stuwen, beverdammen) en de groei van planten. Andere factoren die weerstand bieden aan stroming zijn de vorm van de geul (een slingerende loop geeft meer weerstand dan een rechte

loop) en de ruwheid van de waterbodem en de oever (korrelgrootte, dood hout, oeverplanten).

Het waterpeil wordt ook bepaald door de afvoer, het verhang, het dwarsprofiel en de weerstand. De stroomsnelheid en het waterpeil hebben dus een afhankelijkheid: de stroomsnelheid is gekoppeld aan de waterstand en de waterstand aan de stroomsnelheid. Dit is goed te zien aan de 'output' van 1-dimensionele waterbewegingsmodellen: deze genereren gelijktijdig waterstanden en stroomsnelheden. Met de stroomsnelheid wordt in dit document de gemiddelde snelheid in het gehele dwarsprofiel bedoeld; uiteraard kan de stroomsnelheid binnen het profiel variëren.

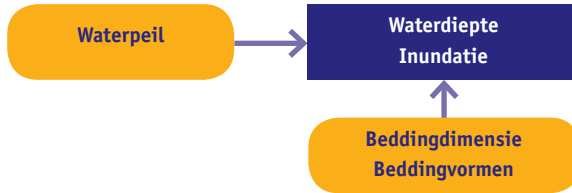
**FIG 2.2 STROOMSNELHEID EN WATERPEIL ALS FUNCTIE VAN AFVOER, VERHANG, SAMENSTELLING BEDDINGMATERIAAL EN DE WEERSTAND**  
*(voornamelijk stuwen en planten)*



De ecologische effecten van stroming en waterpeil lopen langs verschillende 'sporen'. De stroming vormt een belangrijke voorwaarde (milieufactor) voor het vóórkomen van planten, macrofauna en vissen (zie bijlage A en onder andere Verdonshot, 1995). Daarnaast is de stroming van invloed op de zuurstofhuishouding (reaeratie), het sedimenttransport en daarmee de vorming van het bodemsubstraat (zie kopje 'bodemsubstraat' in deze paragraaf). Het waterpeil is (samen met het dwarsprofiel) bepalend voor de waterdiepte en de inundatie van oever en oeverzone, zie figuur 2.3. Droogval wordt gezien als uiterste van de milieufactor 'waterdiepte' (waterpeil is gelijk aan de bodemhoogte).



**FIG 2.3 HET WATERPEIL EN HET DWARSPROFIEL BEPALEN SAMEN DE WATERDIEPTE EN INUNDATIE**



### **Afvoer**

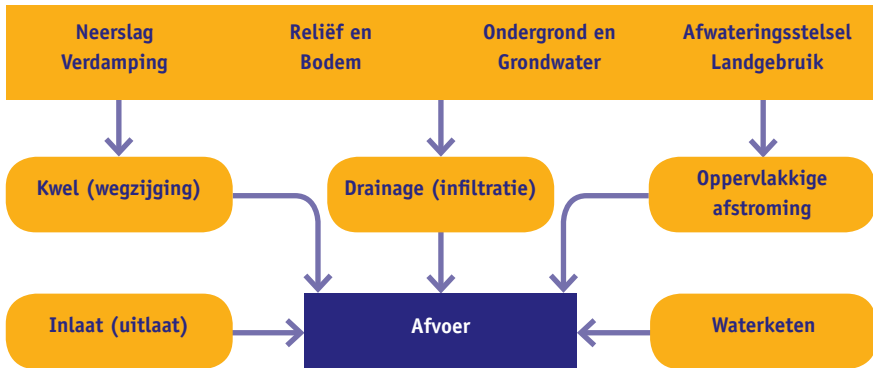
De afvoer is de motor van het systeem en bepaalt voor een belangrijk deel hoe de beek er uitziet. De afvoer is een belangrijke factor (oorzaak) voor de stroomsnelheid. Daarom is het belangrijk om de afvoer van een stroomgebied goed te begrijpen. Hierin staat de relatie tussen de neerslag en de afvoer centraal (neerslag-afvoer relatie).

De afvoer kent verschillende componenten met elk hun eigen processen en tijdsduur. Neerslag kan op verschillende manieren het oppervlaktewater bereiken: direct op het oppervlaktewater (zeer snel), via oppervlakkige afstroming (snel) en via het grondwater (via drainage (vrij snel) en via kwel (langzaam)). Daarnaast kan neerslag het oppervlaktewater bereiken via waterinlaat en de waterketen (rioolwaterzuivering en overstorten), zie figuur 2.4. Andersom kan het water op verschillende manieren uit het oppervlaktewatersysteem verdwijnen, bijvoorbeeld via het grondwater (infiltratie en wegzijging), verdamping en 'uitlaat' van het wateroverschot.

Elk van deze routes heeft zijn eigen kenmerken qua responstijd en processen: hoe snel bereikt de neerslag het oppervlaktewater? Sommige routes dragen bij aan een snelle afvoer, in andere transportroutes wordt de variatie in de afvoer meer gedempt. Het begrijpen van (de onderlinge verhouding) van deze transportroutes is van groot belang om de variatie van de afvoer (en daarmee de stroomsnelheid) in de tijd goed te kunnen verklaren.

De routes zijn ook van belang voor de samenstelling van het water (macro-ionen, nutriënten). De onderlinge verhoudingen, de samenstelling van de verschillende

FIG 2.4 AFVOER, AFVOERCOMPONENTEN EN SYSTEEMKENMERKEN DIE DE AFVOER BEPALEN



waterstromen en de dynamiek hierin bepalen uiteindelijk de samenstelling van oppervlaktewater. De analyse van de verschillende afvoercomponenten is dus ook van belang voor het bepalen van de belasting van het oppervlaktewater (zie van Ek *et al.*, 2018).

De bijdrage en het belang van de verschillende routes wordt voornamelijk bepaald door meteorologie en gebiedskenmerken, zoals hoogteverschillen, eigenschappen van de bodem, het ontwateringspatroon (ligging, drooglegging en dwarsprofiel van de waterlopen) en het landgebruik. Deze aspecten zijn van groot belang om de afvoer karakteristiek en de samenstelling van het water te kunnen verklaren. Een analyse van deze aspecten maakt dan ook onlosmakelijk deel uit van de analyse van de afvoer.

### **Sedimenttransport, beddingdimensies en beddingvormen**

Zodra oppervlaktewater afstroomt over een bodemoppervlak, kan sediment in beweging komen en erosie en transport plaatsvinden, waarbij de beddingdimensies en beddingvormen kunnen veranderen.

#### *Sedimenttransport*

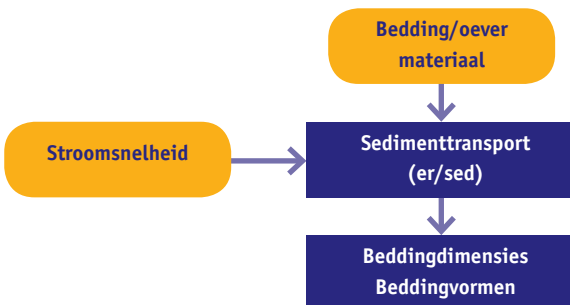
Het sedimenttransport is afhankelijk van de stroomsnelheid van het water en de samenstelling van het bedding- en oevermateriaal, zie figuur 2.1 en 2.5. Het sediment kan ook van bovenstrooms worden aangevoerd. De samenstelling van het

bedding- en oevermateriaal wordt uitgedrukt in korreldiameter ( $\mu\text{m}$  of  $\text{mm}$ ); voor de karakterisering van de samenstelling van het sediment wordt meestal de mediane korreldiameter gebruikt ( $D_{50}$ ).

Een belangrijk moment bij het sedimenttransport is wanneer sedimentdeeltjes in beweging komen. Dit gebeurt wanneer de schuifspanning groter is dan de kritische waarde (de kritische schuifspanning). Deze hangt af van de korreldiameter: hoe groter de korrel (en het gewicht van de korrel), des te groter de kritische schuifspanning en des te groter de stroomsnelheid moet zijn voor sedimenttransport. Daarnaast speelt de cohesie tussen de korrels een rol: bij fijner materiaal 'klevende' korrels beter aan elkaar: leem en klei gaan ondanks hun geringe korrelgrootte niet snel in transport. Fijn zand met een korreldiameter van  $100 \mu\text{m}$  komt het meest gemakkelijk in beweging (is het meest mobiel). Een ander belangrijk moment is wanneer sedimentdeeltjes tot bezinking komen (sedimentatie). Ook dit moment is afhankelijk van de stroomsnelheid en de korrelgrootte van het meegevoerde materiaal.

Het sedimenttransport wordt uitgedrukt als  $\text{kg}$  sediment dat per meter bodembreedte ( $\text{m}$ ) en per tijdseenheid ( $\text{s}$ ) wordt getransporteerd ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ). Voor het beschrijven van het sedimenttransport zijn verschillende formules beschikbaar. Hierbij wordt soms onderscheid gemaakt naar de verschillende manieren van

**FIG 2.5** SEDIMENTTRANSPORT, BEDDINGDIMENSIES EN BEDDINGVORMEN ALS GEVOLG VAN DE STROOMSNELHEID EN HET BEDDING- EN OEVERMATERIAAL



---

transport: rollend over de bedding, salterend of springend en in suspensie. Het goed schatten van het sedimenttransport is complex. Dit geldt zeker voor kleine beken, waar de beddingruwheid als gevolg van de groei van vegetatie groot is (STOWA, 2015-02).

#### *Beddingdimensies en beddingvormen*

Het sedimenttransport is bepalend voor de beddingdimensies (geulpatroon en dwarsprofiel) en voor het optreden van stroomribbels en banken in of langs de waterloop (beddingvormen), zie figuur 2.5. De waargenomen patronen en ontwikkelingen daarin (erosie, sedimentatie, oevererosie, bankvorming) geven veel informatie over het morfologisch functioneren van het watersysteem.

De beddingdimensies die op een gegeven moment aanwezig zijn, zijn het resultaat van de uitschurende werking van de afvoer van water en sediment gedurende een lange termijn. In het algemeen geldt dat ze groter zijn naarmate het debiet groter is (Schumm, 1977; Stevens, 1989; Chorley *et al.*, 1984). Belangrijk is te beseffen dat de beddingdimensies onder natuurlijke omstandigheden een resultante zijn van de hydromorfologische processen in de bedding. De beek of (alluviale) rivier bepaalt in haar zoektocht naar evenwicht zelf haar dimensies en de terugkoppelingsmechanismen in het systeem zorgen voor stabiliteit (dynamisch evenwicht). Hierbij zijn fysische evenwichten en wetmatigheden in het spel.

Onder invloed van de afvoerdynamiek kunnen lokaal geringe fluctuaties in de beddingdimensies optreden. In een bepaald deeltraject kan tijdens een grote afvoer lokaal uitschuring optreden waardoor de dimensies lokaal toenemen. Bij een daarop volgende lage afvoer kan in hetzelfde traject afzetting plaats vinden waardoor de dimensies weer kunnen afnemen. Het is vooral de beddingbodem waar de veranderingen optreden.

Een belangrijk aandachtspunt is dat de morfologie op macroschaal niet zo relevant is voor de karakteristieke organismen, vergeleken met de morfologie op meso- en microschaal. De macromorfologie is echter wel van invloed op de variatie in stroomsnelheid binnen de geul en daarmee een sturende factor voor de vorming van het bodemsubstraat.



---

## **Bodemsubstraat**

Met ‘bodemsubstraat’ worden de aanwezige substraten en de onderlinge verhoudingen van deze substraten bedoeld. Het gaat hierbij zowel om de minerale substraten (grind, zand, lutum) als de ‘dode’ organische substraten (hout, blad, slib). Het substraat vormt een belangrijke voorwaarde (milieufactor) voor het voorkomen van planten, macrofauna en vissen (zie bijlage A en onder andere Verdon-schot, 1995).

De samenstelling van het bodemsubstraat ondergaat periodieke veranderingen als gevolg van (veranderingen in) de stroomsnelheid. Bij lage stroomsnelheden domineert de sedimentatie en kan aanzanding optreden waarbij fijnere sedimenten worden afgezet. Hierdoor zal de bovenste laag van het beddingmateriaal geleidelijk fijner van samenstelling worden. Bij hoge stroomsnelheden treedt erosie op. Hierdoor worden vooral de fijnere bestanddelen uit het beddingmateriaal gespoeld waardoor de bovenste laag grover van samenstelling wordt. De samenstelling van de bovenste laag van het beddingmateriaal weerspiegelt het sedimenttransport van dat moment.

Er is nog weinig bekend over het ontstaan van het bodemsubstraat, de ontwikkeling van het bodemsubstraat in de tijd en de bijbehorende dynamiek (als gevolg van dynamiek in stroomsnelheid en afvoer). Wel is het mogelijk om enkele belangrijke voorwaarden te evalueren die in verband kunnen worden gebracht met het ontstaan van het bodemsubstraat, zie figuur 2.6:

- Sedimenttransport (stabiliteit van de bedding, veel of weinig sedimenttransport, bedekking met slib of silt (sedimentatie)) en variatie in de tijd.
- Variatie van de stroomsnelheid in het dwarsprofiel als gevolg van variatie in het lengteprofiel en beddingvormen.
- Variatie van de stroomsnelheid in het dwarsprofiel als gevolg van houtige begroeiing in de oeverzone van de waterloop en/of het invallen van bomen of takken (bomen; zie ook de tussenrapportage [ESF Bufferzone en waterplanten \(STOWA, 2018\)](#)).
- Input van blad vanuit de oeverzone (bomen; zie ook de tussenrapportage [ESF Bufferzone en waterplanten \(STOWA, 2018\)](#) en tussenrapportage [ESF Belasting stromende wateren \(STOWA, 2018\)](#)).
- Groei van planten in de bedding (zie tussenrapportage [ESF Bufferzone en waterplanten \(STOWA, 2018\)](#)).

FIG 2.6 FACTOREN DIE DE VORMING VAN HET BODEMSUBSTRAAT BEÏNVLOEDEN

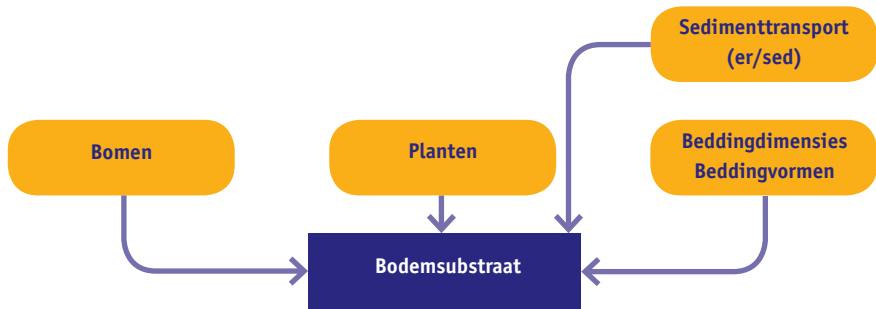
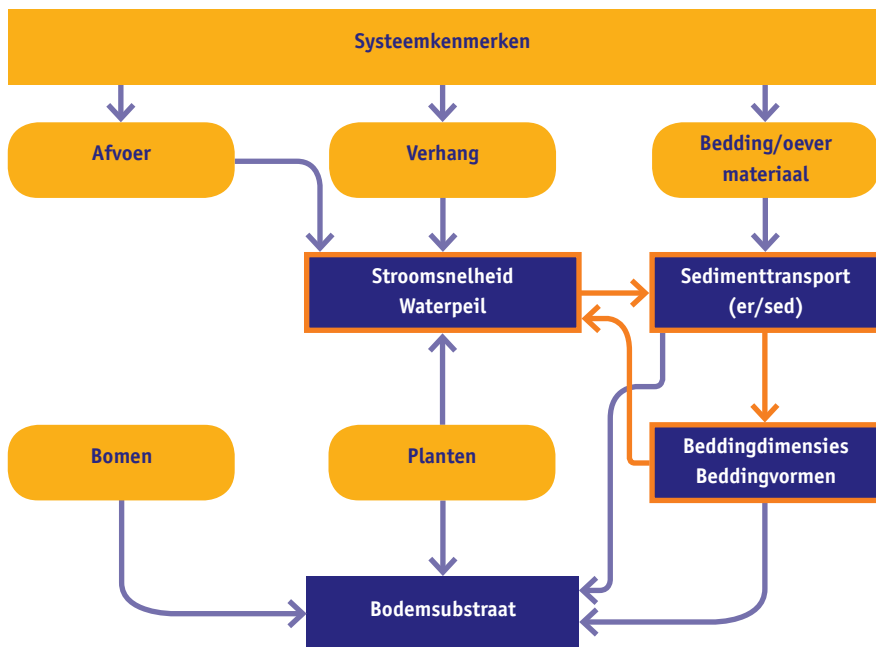


FIG 2.7 RELATIESCHEMA UITWERKING HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE



---

In [figuur 2.7](#) is het relatieschema voor de uitwerking hydrologie en morfologie weergegeven (met uitzondering van de factoren die de afvoer bepalen, [zie hiervoor figuur 2.4](#)). Belangrijk zijn vooral de hiërarchie in de beïnvloeding en de terugkoppelingsmechanismen. In de figuur is het belangrijkste terugkoppelmechanisme tussen stroomsnelheid, sedimenttransport en beddingdimensies oranje gemarkeerd.

Het relatieschema is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid en per definitie onvolledig. De belangrijkste beperking van het relatieschema zoals getoond in [figuur 2.7](#) betreft de rol van de planten. In de uitwerking hydrologie en morfologie is de groei van planten alleen meegenomen als ruwheidsfactor ([zie de afbakening in paragraaf 1.3](#)). De wederzijdse interactie tussen de stroomsnelheid, sedimenttransport (lichtklimaat i.r.t. slibtransport), het bodemsubstraat en planten is niet in beschouwing genomen, [zie ook de discussie over de rol van planten in paragraaf 8.1](#).

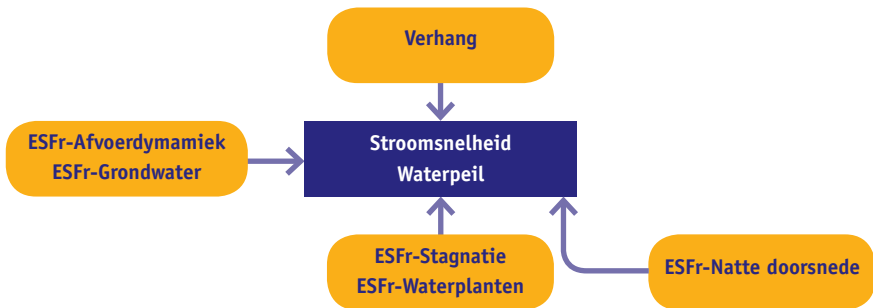
## 2.2 ECOLOGISCHE SLEUTELFACTOREN

Van de geformuleerde sleutelfactoren voor stromende wateren (STOWA, 2015-W06) hebben de volgende sleutelfactoren betrekking op de hydrologie en morfologie ([zie ook § 1.1](#)):

- ESFr-Afvoerdynamiek: de variatie in de afvoer.
- ESFr-Grondwater: de kwantiteit en de kwaliteit van het grondwater.
- ESFr-Natte doorsnede: het dwarsprofiel van insteek tot insteek (hoogste punt van de oever).
- ESFr-Waterplanten (aspect weerstand): de ontwikkeling van water- en oeverplanten in de waterloop.
- ESFr-Stagnatie: de afwezigheid van stroming in de waterloop.

In het relatieschema voor de uitwerking hydrologie en morfologie zijn al deze aspecten benoemd, behalve de kwaliteit van het grondwater. Dit onderdeel van ESFr-Grondwater is ondergebracht bij de uitwerking voor belasting (STOWA, 2018-30), is niet relevant voor de hydrologie en morfologie en wordt daarom in deze uitwerking buiten beschouwing gelaten. Voor de factoren die de ontwikkeling van planten in de waterloop beïnvloeden wordt verwezen naar de uitwerking bufferzone en waterplanten (STOWA, 2018-28).

**FIG 2.8 DE ECOLOGISCHE SLEUTELFACTOREN MET BETREKKING TOT HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE**



De ecologische sleutelfactoren voor de hydrologie en morfologie zijn benoemd rond de factoren die de stroomsnelheid en het waterpeil bepalen, zie figuur 2.7. De afvoerdynamiek (ESFr-Afvoerdynamiek) en de kwantiteit van het grondwater (ESFr-Grondwater) hebben beide betrekking op de factor ‘afvoer’, zie figuur 2.4. De stagnatie (ESFr-Stagnatie) en de ontwikkeling van planten in de waterloop (ESFr-Waterplanten) hebben beide betrekking op de factor ‘weerstand’. Verhoging van de weerstand leidt tot verhoging van het waterpeil en een afname van de stroomsnelheid. Het verhang is niet apart benoemd als ecologische sleutelfactor.

De ecologische sleutelfactoren sluiten goed aan bij enkele belangrijke maatregelen op het gebied van hydrologie en morfologie, bijvoorbeeld:

- *Afvoer*: het vergroten van de basisafvoer door het (langer) vasthouden van water in het stroomgebied (sponswerking).
- *Beddingdimensies*: het verkleinen van het dwarsprofiel door het graven van een nieuwe loop of het inbrengen van zand.
- *Weerstand*: het verkleinen van de weerstand door het verwijderen van stuwen of het tegengaan van plantengroei (onder andere door het ontwikkelen van beekbegeleidende beplanting (bomen) langs de waterloop).
- *Weerstand*: het plaatselijk licht verhogen van de weerstand in het dwarsprofiel door het aanbrengen van dood hout in de waterloop.

---

# H3 METHODEN VOOR HET BEPALEN VAN DE HYDROMORFOLOGISCHE TOESTAND



---

In de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn naast fysisch-chemische ook hydromorfologische kwaliteitselementen benoemd. Deze kwaliteitselementen zijn ‘mede bepalend voor de biologische elementen’ (EG, 2000). Aangezien de hydromorfologische kwaliteitselementen vrijwel geen rol spelen bij het bepalen van de ecologische toestand, heeft de hydromorfologie tot op heden een beperkte rol gekregen bij de implementatie van de KRW in Nederland. Een beschrijving van de hydromorfologische toestand helpt echter wel om de ecologische toestand te kunnen verklaren.

In dit hoofdstuk wordt kort stilgestaan bij methoden om de hydromorfologische toestand te beschrijven. [Paragraaf 3.1](#) gaat in op hydromorfologie in de KRW: wat zegt de KRW over hydromorfologie? Vervolgens worden enkele beschikbare methoden voor het beschrijven van de hydromorfologische toestand beschreven (§ 3.2). In § 3.3 worden deze methoden kort geëvalueerd.

### 3.1 HYDROMORFOLOGIE IN DE KRW

De KRW heeft tot doel om een goede ecologische en chemische toestand te bereiken van het oppervlakte- en grondwater (EG, 2000). De ecologische toestand hangt af van de chemie, biologie en de hydromorfologie; de hydromorfologische toestand is één van de te beoordelen aspecten voor de KRW.

In de KRW worden de volgende hydromorfologische elementen genoemd voor rivieren: hydrologisch regime, morfologie en riviercontinuïteit, [zie tabel 3.1](#). Net als de algemene fysisch-chemische parameters en de specifieke verontreinigende stoffen worden deze elementen beschouwd als ‘medebepalend voor de biologische elementen’.

De hydromorfologie wordt alleen gebruikt voor het onderscheid tussen de goede en zeer goede ecologische toestand. De hydromorfologie speelt geen rol in de beoordeling van sterk veranderde waterlichamen. Kennis van de hydromorfologie is wel van belang voor het bepalen van de status van het waterlichaam (natuurlijk/sterk veranderd), de onderbouwing van het Goede Ecologische Potentieel (GEP; doelstelling voor kunstmatige en sterk veranderde wateren) en om richting te geven aan eventuele maatregelen. Verder ondersteunt de hydromorfologische beoordeling de interpretatie van het ecologisch functioneren van het waterlichaam.

De monitoring van hydromorfologische parameters is verplicht voor alle waterlichamen. De beoordeling en rapportage van de hydromorfologische toestand is niet verplicht voor kunstmatige en sterk veranderde waterlichamen (Osté *et al.*, 2013).

**TABEL 3.1 HYDROMORFOLOGISCHE ELEMENTEN VOOR RIVIEREN**

*Mede bepalend voor de biologische elementen (EG, 2000).*

ELEMENT	ASPECT
Hydrologisch regime	Kwantiteit en dynamiek van de waterstroming Verbinding met grondwaterlichamen
Riviercontinuïteit	Sedimenttransport en migratie van organismen
Morfologie	Variaties in rivierdiepte en -breedte Structuur en substraat van de rivierbedding Structuur van de oeverzone

### 3.2 BESTAANDE METHODEN

In deze paragraaf worden vier methoden voor het bepalen van de hydromorfologische toestand beschreven: het Handboek hydromorfologie, de Handreiking Ontwikkeling Waterlopen, de Gewässerstrukturgütekartierung en de Morphological Quality Index. Methoden voor het bepalen van de hydromorfologische toestand bestaan over het algemeen uit een lijst van relevante hydromorfologische parameters, al dan niet voorzien van klassengrenzen om de toestand per parameter te kunnen beoordelen ('goed', 'matig' of 'slecht').

#### **Handboek hydromorfologie**

De beoordeling van de hydromorfologie voor de KRW is uitgewerkt in het handboek hydromorfologie (Osté *et al.*, 2013). Het handboek is een beoordelingssysteem, waarmee de hydromorfologische toestand van een waterlichaam inzichtelijk wordt gemaakt. Het handboek geldt als de standaardmethode voor Nederland.

Voor rivieren wordt de beoordeling gebaseerd op 22 parameters, zie tabel 3.2. In de beoordeling staat de afwijking van de natuurlijke omstandigheden centraal. In het handboek worden drie typen van beoordeling onderscheiden: 'expert judgement', 'trendanalyse' en 'afleiding data'. In alle gevallen wordt de mate van afwijking zoveel mogelijk gebaseerd op verzamelde gegevens; in het geval van **parame-**

ter 3.1 en 3.2 (passeerbaarheid barrières voor sediment en vissen) zijn dit bijvoorbeeld het aantal, type en passeerbaarheid van de obstructies of voorzieningen. Bij parameters met ‘trendanalyse’ wordt de beoordeling uitgevoerd op basis van een tijdreeks. Bij de parameters met de aanduiding ‘afleiding data’ wordt de beoordeling primair gebaseerd op afgeleide grenswaarden.

**TABEL 3.2 PARAMETERS EN KLASSENINDELING**

*Voor de beoordeling van de hydromorfologische toestand voor rivieren volgens het handboek hydromorfologie (Osté et al., 2013).*

PARAMETER	AANTAL KLASSEN	TYPE BEOORDELING	GRENSWAARDE GOED
3.1 Passeerbaarheid barrières voor sediment	3	expert judgement	geen barrières
3.2 Passeerbaarheid barrières voor vissen	5	expert judgement	geen barrières
3.3 Bereikbaarheid voor vissen	5	expert judgement	geen barrières of geen effect
3.4 Inundatiefrequentie en inundatieduur	3	trendanalyse	niet beïnvloed
3.5 Afvoer		geen	
3.6 Stroomsnelheid	3	trendanalyse	referentiewaarden <sup>1</sup>
3.7 Mate van vrije afstroming	5	afleiding data	≤ 15% beïnvloed
3.8 Mate van natuurlijk afvoerpatroon	3	expert judgement	niet beïnvloed
3.9 Getijdenkarakteristiek: kentering	2	afleiding data	aanwezig
3.10 Getijdenkarakteristiek: getijslag	3	trendanalyse	niet beïnvloed
3.11 Getijdenkarakteristiek: beïnvloeding getijvolume	3	trendanalyse	niet beïnvloed
3.12 Grondwaterstand	3	afleiding data	niet gereguleerd
3.13 Rivierloop	5	expert judgement	≤ 15% veranderd
3.14 Dwarsprofiel en mate van natuurlijkheid	5	expert judgement	≤ 15% onnatuurlijk
3.15 Aanwezigheid van kunstmatige bedding	5	afleiding data	≤ 5% kunstmatig

PARAMETER	AANTAL KLASSEN	TYPE BEOORDELING	GRENSWAARDE GOED
3.16 Mate van natuurlijkheid substraatsamenstelling bedding	3	trendanalyse	niet beïnvloed
3.17 Erosie/sedimentatie structuren	3	expert judgement	niet beïnvloed
3.18 Aanwezigheid oeververdediging	5	afleiding data	≤ 15% verdedigd
3.19 Landgebruik oever	5	afleiding data	≤ 15% onnatuurlijk
3.20 Landgebruik in uiterwaard/beekdal	5	afleiding data	≤ 15% onnatuurlijk
3.21 Mate van natuurlijke inundatie	5	expert judgement	≤ 15% beïnvloed
3.22 Mogelijkheid tot natuurlijke meandering	3	expert judgement	vrije meandering

<sup>1</sup> zie STOWA, 2012-31 en tabel 7.12 in dit rapport

### Handreiking ontwikkeling waterlopen (HOW)

In 2012 is de Handreiking Ontwikkeling Waterlopen (HOW) gereedgekomen (Buskens *et al.*, 2012). De handreiking heeft als doel het bieden van ondersteuning en richtlijnen bij de uitvoering van beek- en kreekherstelprojecten. Op basis van de HOW zijn 29 parameters beschreven voor de karakterisering van de ecologische toestand, verdeeld in vijf groepen: hydrologie, morfologie, waterkwaliteit, overstorten en waterkwaliteit biologisch (Waterschap De Dommel, 2016). De parameters geven aan wat de belangrijkste knelpunten zijn voor het behalen van de ecologische doelen (GEP's) en welke specifieke ecologische kansen er zijn (Evers en Schipper, 2016). In tabel 3.3 zijn de parameters voor de hydrologie en morfologie opgenomen.

De parameters worden per uniform traject beschreven en beoordeeld in drie klassen (goed, matig, slecht). De indeling in klassen is veelal gebaseerd op expert judgement, ondersteund door analyses in het kader van de ontwikkeling van de KRW-Verkenner (Expertsysteem Ecologische Effecten (EEE)), de maatlatdocumenten



(STOWA, 2012-31) en specifiek onderzoek (Verdonschot en van den Hoorn, 2005; Evers en Schipper, 2016).

### TABEL 3.3 UITWERKING VAN PARAMETERS EN KLASSEN-INDELING

Voor de beoordeling van de hydromorfologische toestand van R-typen volgens de HOW-methodiek (Evers en Schipper, 2016).

PARAMETER	AANTAL KLASSEN	GRENSWAARDE GOED*
<b>Hydraulisch/hydrologisch</b>		
Gemiddelde zomer stroomsnelheid (juli-aug-sept) (cm/s)	3	≥ 18; ≥ 14; ≥ 10
Gehanteerd peilregime	3	natuurlijk; vast of var.; vast of var.
Debietfluctuatie (T=1)/voorjaar (april-mei)	3	≤ 4; ≤ 6; ≤ 8
Stuwen aanwezig	3	nee; nee; n.v.t.
Percentage waterdeel onder invloed van verstuwing	3	0; 0; n.v.t.
Vispasseerbaarheid (incl. werking)	3	goed; goed; n.v.t.
<b>Morfologisch</b>		
Sinuositeit (lengte loop/ lengte beekdal)	3	≥ 1,25; ≥ 1,06; ≥ 1,06
Percentage beschaduwing	3	≥ 40; ≥ 20; ≥ 15
Type begroeiing rond oevers	3	alles behalve 'geen' of 'laanbomen'
Percentage beschoeiing	3	< 1; < 1; < 1
Profielvorm uit HOW	3	natuurlijk; accolade; 2-fasen
Percentage lengte waterloop met actieve sedimentatie/erosie	3	≥ 75; ≥ 25; ≥ 25
Percentage van het natte profiel gemaaid per maaiperiode	3	≤ 50; ≤ 75; ≤ 75

\*De grenswaarde hangt af van het dominant landgebruik: natuur (links), landbouw én natuur (verweven) (midden) of landbouw (rechts)

### Gewässerstrukturgütekartierung (GSK)

De Gewässerstrukturgütekartierung (GSK) is een gestandaardiseerde opnamemethode waarin de 'ecologische functionaliteit van waterstructuren' wordt bepaald.

De methode beschrijft de veranderingen als gevolg van menselijke ingrepen en kan gebruikt worden om ingrepen te beoordelen en (ecologische) doelen te bepalen. De methode is ontwikkeld voor heel Duitsland (LAWA, 2000), met specifieke uitwerkingen voor deelstaten zoals Nordrhein Westfalen (LANUV, 2012) en grote rivieren (BfG, 2001). De methode is ook door een aantal waterschappen in Nederland toegepast (Van der Hoek, 1998; Osté *et al.*, 2013).

Ten behoeve van de beoordeling worden 25 vormaspecten (parameters) van een waterloop gekarteerd, gegroepeerd in zes hoofdparameters, zie tabel 3.4. Hiervoor wordt de waterloop ingedeeld in trajecten van 100 meter of een veelvoud daarvan, tot maximaal 1 km.

Bij de methode kan gebruik gemaakt worden van een softwarepakket dat de kwaliteitsklasse berekent. De berekening van de kwaliteitsklassen per hoofdparameter gebeurt door optelling van de 'scores' voor de onderliggende individuele parameters, waarna een rekenkundig gemiddelde wordt berekend. De beoordeling van de parameters is afhankelijk van het watertype en de grootteklasse.

De kwaliteitsklassen geven de afwijking ten opzichte van de onverstoorde, natuurlijke situatie. Er zijn zeven klassen gedefinieerd, van onveranderd (klasse 1) tot volledig veranderd (klasse 7). Met het softwarepakket worden de resultaten gepresenteerd op een kaart met de beoordelingsresultaten voor de bedding, oever (links en rechts) en omgeving (links en rechts).

**TABEL 3.4 PARAMETERS EN KLASSEN-INDELING**

*Voor de kartering van de Gewässerstrukturgüte (LAWA, 2000).*

HOOFDPARAMETER	PARAMETER	AANTAL KLASSEN	GRENSWAARDE GOED*
1 Loopontwikkeling	1.1 Loopkromming	7	(sterk) slingerend
	1.2 Bochterosie	5	bij slingerend: n.v.t. bij recht: sterk
	1.3 Zand/grindbanken in lengterichting	6	≥ 2

HOOFDPARAMETER	PARAMETER	AANTAL KLASSEN	GRENSWAARDE GOED*
	1.4 Bijzondere loopstructuren	6	≥ 1
2 Lengteprofiel	2.1 Kunstwerken (stuwen e.a.)	11 typen	afwezig
	2.2 Opstuwing	4	afwezig
	2.3 Duikers	4	≤ 5% van de lengte
	2.4 Banken in dwarsrichting	6	≥ 1
	2.5 Stromingsdiversiteit	5	groot
	2.6 Variatie in diepte	5	groot
3 Dwarsprofiel	3.1 Type profiel	7	natuurlijk
	3.2 Profieldiepte	5	ondiep
	3.3 Breedte erosie	3	bij ondiep: n.v.t. bij diep: sterk
	3.4 Variatie in de breedte	5	matig of groot
	3.5 Bruggen/overkluizingen	5	afwezig of niet schadelijk
4 Beddingstructuur	4.1 Type (hoofd)substraat	10 typen	geen slib
	4.2 Beddingvastlegging	4	< 10%
	4.3 Substraatdiversiteit	5	matig of groot
	4.4 Bijzondere beddingstructuren	6	≥ 1
5 Oeverstructuur	5.1 Oeverbegroeiing (bomen/ kruiden)	13 typen	bos, kleinschalig landschap, riet
	5.2 Vastlegging oever	8 typen, 2 klassen	< 10% van de lengte
	5.3 Bijzondere oeverstructuren	6	≥ 2
6 Beekomgeving	6.1 Type grondgebruik	9 typen, 2 klassen	biotopen, grasland
	6.2 Oeverstroken	4 typen, 2 klassen	natuurlijk
	6.3 Schadelijke omgevingsstructuren	6 typen, 3 klassen	afwezig

*\*Weergegeven is de grenswaarde van de kwaliteitsklasse 2 per parameter (niet tot weinig veranderd). De hydromorfologische toestand wordt berekend met een formule op basis van alle parameters; voor de klasse 'goed' hoeven niet alle parameters te voldoen.*

### Morphological Quality Index (MQI)

De Morphological Quality Index (Rinaldi, 2016) is recent ontwikkeld in het kader van het project REFORM ([www.reformrivers.eu](http://www.reformrivers.eu)) en is toepasbaar voor heel Europa. Met de MQI wordt de morfologische kwaliteit van rivieren vastgesteld aan de hand van 28 parameters verdeeld over 5 aspecten, zie tabel 3.5.

**TABEL 3.5 PARAMETERS EN KLASSEN-INDELING VAN DE MORPHOLOGICAL QUALITY INDEX (RINALDI ET AL., 2016)**

PARAMETER	AANTAL KLASSEN	GRENSWAARDE GOED*
<b>Continuïteit lengte</b>		
F1 Passeerbaarheid van structuren voor sediment en hout	3	geen barrières
A1 Verandering van de afvoer bovenstrooms	3	≤ 10% verandering geulvormende afvoer
A2 Aanwezigheid van barrières voor sediment bovenstrooms (bedload)	5	afwezig
A3 Verandering van de afvoer in het traject	3	≤ 10% verandering geulvormende afvoer
A4 Aanwezigheid van barrières voor sediment in het traject (bedload)	3	afwezig
A5 Aanwezigheid van voorzieningen die de	3	afwezig waterloop kruisen
<b>Continuïteit breedte</b>		
F2 Aanwezigheid van een aaneengesloten overstromingsvlakte	4	> 66% van de lengte > 2x geulbreedte
F3 Verbinding met hooggelegen delen buiten de overstromingsvlakte	3	> 90% van de lengte
F4 Aanwezigheid van oevererosie	3	> 10% van de lengte
F5 Mogelijkheid tot oevererosie/aanwezigheid meanderzone	3	> 66% van de lengte > 2x geulbreedte
A6 Aanwezigheid van oeververdediging	3	≤ 5% van de lengte
A7 Aanwezigheid van dijken	3	≤ 5% van de lengte



PARAMETER	AANTAL KLASSEN	GRENSWAARDE GOED*
<b>Morfologie geulpatroon</b>		
F6 Mate van natuurlijkheid van beddingvormen in de breedte	3	vormen zijn passend bij verhang
F7 Mate van natuurlijkheid van geulvorm en geomorfologische elementen	3	≤ 5% onnatuurlijk
F8 Aanwezigheid van kenmerkende structuren in de overstromingsvlakte	3	aanwezig
A8 Verandering van de rivierloop	3	afwezig
CA1 Aanpassingen van het geulpatroon	3	afwezig sinds 1930 incl. A6
<b>Morfologie dwarsprofiel</b>		
F9 Dwarsprofiel en mate van natuurlijkheid	3	≤ 5% onnatuurlijk
CA2 Aanpassingen van de geulbreedte	3	≤ 15% van de lengte sinds 1930
CA3 Aanpassingen van de hoogte van de beddingbodem	4	≤ 0,5m incl. A4, A9, A10
<b>Morfologie bodemsubstraat</b>		
F10 Aanwezigheid van kunstmatige bedding	3	afwezig
F11 Aanwezigheid van beek- of rivierhout	3	> 50% van de lengte
A9 Aanwezigheid van kunstmatige bedding (overige structuren)	4	afwezig
A10 Verwijdering van sediment	4	afwezig sinds 100 jr.
A11 Verwijdering van hout	3	afwezig sinds 20 jr.
<b>Vegetatie</b>		
F12 Breedte van de functionele oevervegetatie	3	> 2x geulbreedte
F13 Aanwezigheid van aaneengesloten functionele oevervegetatie	3	> 90% van de lengte
A12 Verwijdering van de oevervegetatie (o) en watervegetatie (w)	3	o: afwezig sinds 20 jr. w: afwezig sinds 5 jr.
* Weergegeven is de grenswaarde van de hoogste kwaliteitsklasse per parameter. De hydromorfologische toestand wordt berekend met behulp van een formule op basis van alle parameters; voor de klasse 'goed' hoeven niet alle parameters te voldoen.		

---

De MQI wordt bepaald op trajectniveau. De indeling in trajecten gebeurt op basis van geologische en geomorfologische kenmerken van het landschap. Verder worden trajecten onderscheiden op basis van de beschikbaarheid van de overstromingsvlakte (als gevolg van berghellingen of terrassen), het geulpatroon (vlechtend, meanderend of recht) en andere relevante kenmerken (knikpunten in verhang, afvoer, bodemtype en dergelijke).

Ten behoeve van de beoordeling zijn de afzonderlijke parameters opgedeeld in drie klassen: onverstoord of licht veranderd, matig veranderd en sterk veranderd. Hierbij zijn de klassengrenzen vastgesteld op basis van expert-judgement (Rinaldi *et al.*, 2016). Na de bepaling van de afzonderlijke parameters op basis van GIS-informatie of waarnemingen in het veld, wordt de MQI berekend met behulp van een formule. De hydromorfologische beoordeling wordt ondersteund door twee werkbladen in Excel<sup>1</sup>. Het resultaat is een kwaliteitsklasse, variërend van zeer goed (klasse 1) tot slecht (klasse 5).

### 3.3 EVALUATIE VAN DE METHODEN

Bij een blik op de methoden van § 3.2 valt allereerst op dat de evaluatiemethoden en parameters veel overeenkomsten vertonen. Vooral het handboek en de MQI lijken wat dat betreft veel op elkaar, maar dat is niet vreemd aangezien beide methoden voortbouwen op de standaard van de CEN (2002). Wat verder opvalt, is dat de klassenindeling vrij 'streng' is: om de klasse 'goed' te bereiken, is vaak maar een kleine afwijking van de natuurlijke omstandigheden toegestaan. Dit sluit wel aan bij de normatieve definities van ecologische toestandsklassen uit de KRW (zie bijlage V), maar beperkt de bruikbaarheid voor de (sterk veranderde) Nederlandse situatie.

In tabel 3.6 zijn de besproken methoden uit § 3.2 met elkaar vergeleken aan de hand van een aantal criteria. Het toepassingsniveau verschilt van waterlichaam (handboek hydromorfologie) tot stukken van 100 meter waterloop (GSK). Dit maakt niet veel uit voor de bewerkelijkheid van de methode: in alle gevallen moet er informatie worden verzameld over een groot aantal parameters. De bewerkelijk-

---

<sup>1</sup> <https://reformrivers.eu/guidebook-evaluation-stream-morphological-conditions-morphological-quality-index-mqi>

heid van de GSK is het grootste als gevolg van het grotere detailniveau en de benodigde veldinformatie; die van de HOW-uitwerking het kleinste omdat het aantal parameters beperkt is en de meeste parameters relatief eenvoudig te bepalen zijn.

**TABEL 3.6 VERGELIJKING VAN DE BESPROKEN METHODEN VOOR HET BEPALEN VAN DE HYDROMORFOLOGISCHE TOESTAND**

CRITERIUM	HANDBOEK	HOW	GSK	MQI
Toepassingsniveau	waterlichaam	traject	100m	traject
Bewerkelijkheid van de methode	+/-	+	-	+/-
Toegesplitst op de Nederlandse situatie	+	+	+/-	-
Kleinschalige dynamische processen	-	-	-	-
Klassengrenzen gerelateerd aan de ecologische toestand	-	+/-	-	-

*Toelichting op de gebruikte symbolen: +: goed; +/-: matig; -: slecht*

Een ander belangrijk aspect is de toepasbaarheid op de Nederlandse situatie. De reikwijdte van de GSK (Duitsland) en de MQI (Europa) is vrij groot, waardoor het onderscheidend vermogen voor de laaglandsituatie beperkt is. Het handboek hydromorfologie en de HOW-uitwerking zijn een stuk beter toegespitst op de Nederlandse situatie, de HOW onderscheidt zelfs klassen voor verschillende KRW-typen en ambitieniveaus.

Een ander opvallend kenmerk is dat de nadruk bij eigenlijk alle methoden op de waarneembare, grootschalige vormen en structuren ligt, terwijl het juist de kleinschalige dynamische processen op de beddingbodem zijn die voor het onderscheid en de ecologisch relevante variatie zorgen. Deze processen hangen samen met het sedimenttransport, bijvoorbeeld afzettingen van slib gedurende een groot deel van het jaar en de mate van verandering van de bodemligging en het beddingmateriaal. Dergelijke (subtielere) processen komen niet (of slechts zeer beperkt) aan de orde bij de beschreven methoden.

Ten slotte valt op dat de beoordeling en de indeling in klassengrenzen voor een groot deel zijn gebaseerd op 'expert-judgement'. Van de gebruikte hydromorfo-

---

gische kenmerken is over het algemeen bekend dat ze relevant zijn voor de ecologische toestand, maar doorgaans blijft onduidelijk hoe dan precies. Dit geldt in mindere mate voor de HOW-methodiek; waar mogelijk zijn hier de klassengrenzen gebaseerd op (empirische) relaties tussen de waarde voor de parameters en de score voor biologische kwaliteitselementen.

Het ontbreken van een goed verband met de ecologische toestand geldt als een belangrijke beperking bij het gebruik van de hydromorfologische toestandbeschrijving. Bovendien geeft deze over het algemeen geen inzicht in de achterliggende processen en in afhankelijkheden tussen de beschreven parameters (zoals bijvoorbeeld tussen de hydrologie en de morfologie).

.....





## H4 QUICKSCAN



---

In de quickscan wordt op een snelle manier een eerste beeld gevormd van het hydrologisch en morfologisch functioneren van het watersysteem. Bij de stappen voor de quickscan hydrologie en morfologie sluiten we aan bij de eerste stap volgens het Handboek Ecohydrologische Systeemanalyse Beekdallandschappen: de eerste algemene oriëntatie ( STOWA, 2017-05). Een quickscan, of de eerste algemene oriëntatie, is gericht op het hele stroomgebied en bestaat uit de volgende stappen:

- 1 Het verzamelen van bestaande, gemakkelijk te verkrijgen informatie over het stroomgebied.
- 2 Het eerste, oriënterende veldbezoek.
- 3 Het formuleren van een eerste globale idee over de hydrologie van het stroomgebied.
- 4 De evaluatie.

#### 4.1 VERZAMELEN VAN BESTAANDE, EENVOUDIG TE VERKRIJGEN INFORMATIE

De eerste stap is het verzamelen van bestaande, eenvoudig te verkrijgen informatie over het stroomgebied:

- Bestaande rapporten over het gebied.
- Reeds uitgevoerde modelonderzoeken met documentatie.

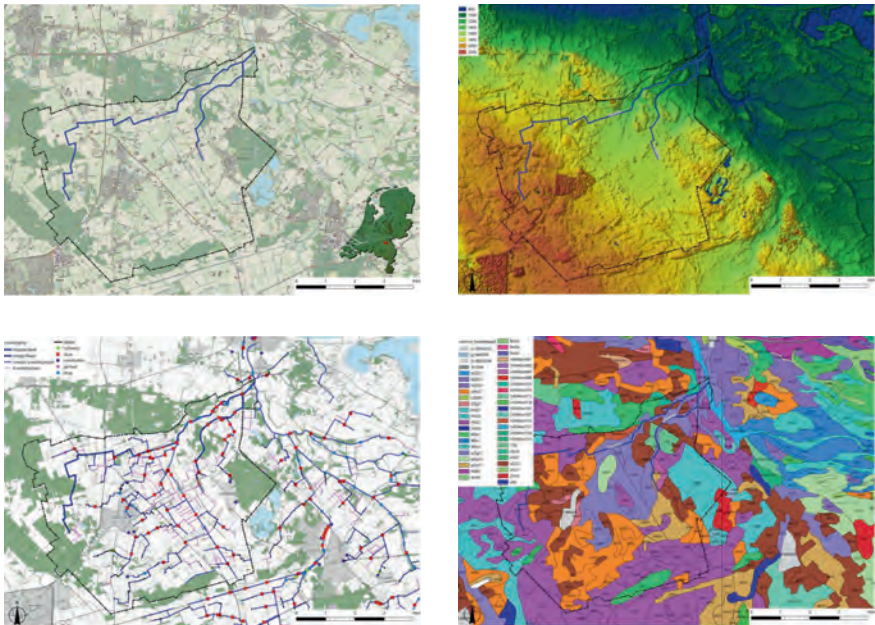
Daarnaast worden ter ondersteuning van de startbijeenkomst en het veldbezoek enkele basale kaarten verzameld of gemaakt in GIS:

- Een topografische kaart met de ligging van het stroomgebied en het aandachtsgebied.
- Een hoogtekaart van het stroomgebied ([www.ahn.nl](http://www.ahn.nl)) met hierin de belangrijkste waterlopen. Zie ook § 5.5 in Besselink *et al.* (2017).
- Een geomorfologische kaart van het stroomgebied (Koomen en Maas, 2004) met hierin de belangrijkste waterlopen. Zie ook § 5.5 in Besselink *et al.* (2017).
- Een kaart van het watersysteem met alle hoofdwaterlopen, zijwaterlopen en de belangrijkste deelgebieden van het stroomgebied. Neem in de kaart ook de belangrijkste kunstwerken en bronnen van oppervlaktewater op: stuwen, gemalen, RWZI, overstorten, inlaatpunten, onttrekkingen (drinkwater, industriewater), etc. Zie ook § 5.8 in Besselink *et al.* (2017).
- Een bodemkaart van het stroomgebied (<http://pdokviewer.pdok.nl/>, bro-bodemkaart 1:50.000) met hierin de belangrijkste waterlopen. Zie ook § 5.10 in Besselink *et al.* (2017).

- Een landgebruikskaart van het stroomgebied (LGN). Zie ook § 5.12 in Besselink *et al.* (2017).
- Het historisch landgebruik en afwateringsstelsel, bijvoorbeeld via [www.topotijdreis.nl](http://www.topotijdreis.nl). Zie ook § 5.13 in Besselink *et al.* (2017).

#### FIG 4.1 KAARTEN TER ONDERSTEUNING VAN HET VELDBEZOEK (HOOGTE RAAM)

Vlnr: topografische kaart, hoogtekaart, watersysteemkaart en bodemkaart.



#### 4.2 STARTBIJeenKOMST EN ORIËTEREND VELDBEZOEK

Een goede manier om snel een eerste indruk te krijgen van de werking van het watersysteem is het organiseren van een startbijeenkomst, gecombineerd met een veldbezoek. De startbijeenkomst en het veldbezoek zijn gericht op het verzamelen van informatie ten behoeve van een eerste globale idee over de hydrologie en morfologie van het stroomgebied (§ 4.3) en het inventariseren van beschikbare informatie ten behoeve van de globale analyse (zie hoofdstuk 5).

---

## Startbijeenkomst

Bij de analyse volgens de systematiek met ESF's, en dus ook bij de quickscan, zijn veel disciplines nodig. Hierbij moeten tenminste de volgende deskundigen betrokken worden:

- Hydroloog;
- Ecoloog;
- Medewerker monitoring en gegevensanalyse;
- Medewerker onderhoud (maaibeheer);
- Medewerker peilbeheer.

Verder kan gedacht worden aan:

- Medewerker waterkwaliteit;
- Hydrobiologisch analist;
- Medewerker planvorming/ gebiedsadviseur;
- Beleidsmedewerker.

De onderwerpen uit § 4.3 en hoofdstuk 5 vormen een goede leidraad (agenda) voor de startbijeenkomst:

- De grenzen van het stroomgebied;
- De indeling van het watersysteem in trajecten;
- Het beeld van de toestand (stroomsnelheid, waterpeil en bodemsubstraat);
- De voorwaarden (oorzaken) voor het ontstaan van de toestand (afvoer, verhang, beddingdimensies en weerstand).

Voor het uitvoeren van de quickscan is kwalitatieve (verhalende) informatie voldoende, met uitzondering van het verhang, de stroomsnelheid, de waterpeilen en het bodemsubstraat: voor deze parameters is kwantitatieve informatie gewenst (voor zover beschikbaar). Beschouw ook de variatie in ruimte en tijd.

Gebruik de startbijeenkomst daarnaast om te inventariseren welke kwantitatieve informatie beschikbaar is ten behoeve van de globale analyse. Gebruik daarvoor de checklist in [bijlage B](#).

Ten slotte wordt tijdens de startbijeenkomst bepaald welke locaties bezocht moeten worden tijdens het veldbezoek. Maak hiervoor een kaart met te bezoeken locaties.

---

## Veldbezoek

Het eerste veldbezoek is gericht op het verkrijgen van een algemeen beeld van (het functioneren van) het stroomgebied. Tijdens het veldbezoek worden enkele karakteristieke locaties bezocht en worden de aanwezige deskundigen verder bevroegd op de toestand, de voorwaarden (oorzaken) voor het ontstaan van de toestand (zie hoofdstuk 5) en de aanwezige variatie in ruimte en tijd. Tijdens het veldbezoek worden ook (aanvullende) waarnemingen gedaan op deze aspecten. Zie voor meer informatie over het veldbezoek ook § 4.2.2 uit Besselink *et al.* (2017).

### 4.3 EERSTE GLOBALE IDEE OVER DE HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE

Op basis van de bestaande, eenvoudig te verkrijgen informatie, de informatie uit de startbijeenkomst en het veldbezoek wordt een eerste globale idee verkregen over de hydrologie en morfologie van het stroomgebied. Hierbij worden de grenzen van het stroomgebied bepaald en worden de waterlopen ingedeeld in trajecten. Voor de onderscheiden trajecten wordt een beeld geschetst van de toestand aan de hand van de relevante hydromorfologische milieufactoren: de stroomsnelheid, het waterpeil en het bodemsubstraat.

#### Grenzen van het stroomgebied

Bepaal de grenzen van het stroomgebied. Identificeer mogelijke ‘randen’ op logische punten in het stroomgebied (inlaatpunten, meetpunten waterkwantiteit, ...). Het bepalen van de randen van het aandachtsgebied is een belangrijk onderdeel van de hydrologische analyse; het is tevens belangrijk dat de gemaakte keuzes regelmatig worden getoetst op juistheid.

#### Indeling in trajecten

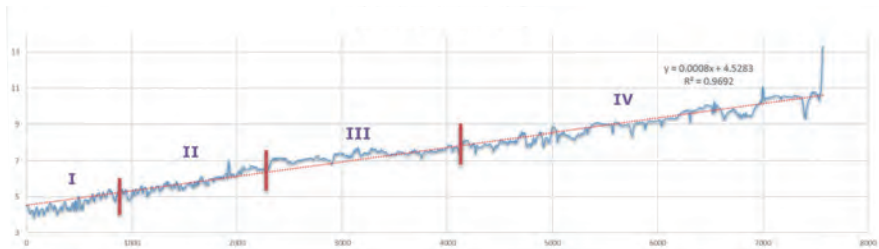
Maak een indeling van de waterlopen van het stroomgebied in trajecten. De trajecten zijn zoveel mogelijk uniform. Beschouw hierbij vooral de landschappelijke context (geomorfologie, verhang en samenstelling van het bedding- en oevermateriaal) en de belangrijkste overige factoren die van belang zijn voor het ontstaan van de ecologische toestand: de afvoer, de beddingdimensies (geulpatroon en dwarsprofiel) en de aanwezigheid van stuwen en plantengroei (weerstand). De indeling moet gericht zijn op de meest bepalende factoren binnen het stroomgebied en mag (zeker in de fase van de quickscan) nog grof zijn. Begin daarom met een indeling op basis van verhang en stuwen en maak daarna een verfijning op basis van de overige factoren.

- 
- **Landschappelijke context:**
    - *Geomorfologie.* Onderscheid op basis van de hoogtekaart en de geomorfologische kaart trajecten waar de beek ingesneden ligt in het landschap en waar zij van nature een overstromingsvlakte heeft. Beschouw hierbij eventueel de landschappelijke beektypen, zie bijlage 2 in STOWA, 2015-02.
    - *Verhang.* Het verhang is het verloop van de bodemhoogte of de waterhoogte langs de lengte van de waterloop. Het verhang wordt uitgedrukt in meters per kilometer (m/km). Maak een lengteprofiel van de bodemhoogte door de as van het dal en onderscheid trajecten op basis van 'knikpunten' in het verhang, zie bijvoorbeeld figuur 4.2. Gebruik hier voor het AHN. Indien de waterloop (min of meer) door de as van het dal loopt, gebruik dan de maaiveldhoogte op 10-15 meter uit de oeverlijn en (GIS-bewerking). De maaiveldhoogte direct langs de oever is namelijk vaak aangepast ten behoeve van het onderhoudspad. Soms zijn er (aanzienlijke) verschillen tussen de linker- en de rechteroever; vanuit dit oogpunt is het nuttig zowel het maaiveldverhang aan de linkerzijde als de rechterzijde van de watergang te beschouwen.
    - *Bodem.* Bekijk de bodemkaart en de ligging van de waterlopen ten opzichte van de voornaamste bodemtypen (zand, veen, klei). De bodemtypen hebben verschillende hydrologische en geomorfologische eigenschappen, zie § 7.1. Bekijk hoe deze overgangen samenhangen met andere kenmerken van het watersysteem (onder andere beddingdimensies) en of deze aanleiding geven voor het onderscheiden van trajecten.
  - **Afvoer.** Bekijk de kaart van het watersysteem met alle hoofdwaterlopen, zijwaterlopen en de belangrijkste bronnen en onttrekkingen van oppervlaktewater (incl. RWZI, overstorten, gemalen, in- en uitlaatpunten, etc.). Bepaal de stromingsrichting van het water en maak hierbij eventueel onderscheid tussen de afvoersituatie (winterperiode) en aanvoersituatie (zomerperiode). Onderscheid trajecten met een vergelijkbaar afvoerverloop.
  - **Beddingdimensies.** Onderscheid indien nodig trajecten op basis van het geulpatroon (recht of slingerend) en het dwarsprofiel (genormaliseerd, natuurlijk of anderszins afwijkend).
  - **Weerstand.** Bekijk waar de ligging van stuwen en de groei van planten in de bedding aanleiding geven voor het onderscheiden van extra trajecten. Stuwen



vormen vaak logische grenzen tussen trajecten. Kijk in hoeverre de trajecten samenvallen met de locatie van stuwen en pas eventueel de trajectgrenzen hierop aan. Onderscheid verder trajecten met veel plantengroei in de bedding van trajecten met weinig tot geen plantengroei. Het onderhoudsregime vormt hiervoor een goede indicator. Maak in eerste instantie onderscheid tussen trajecten waar wel en trajecten waar geen onderhoud nodig is.

**FIG 4.2 DALVERHANG VAN HET GASTERENSE DIEP EN DE INDELING IN DEELTRAJECEN OP BASIS VAN HET DALVERHANG (MAAS, 2018)**



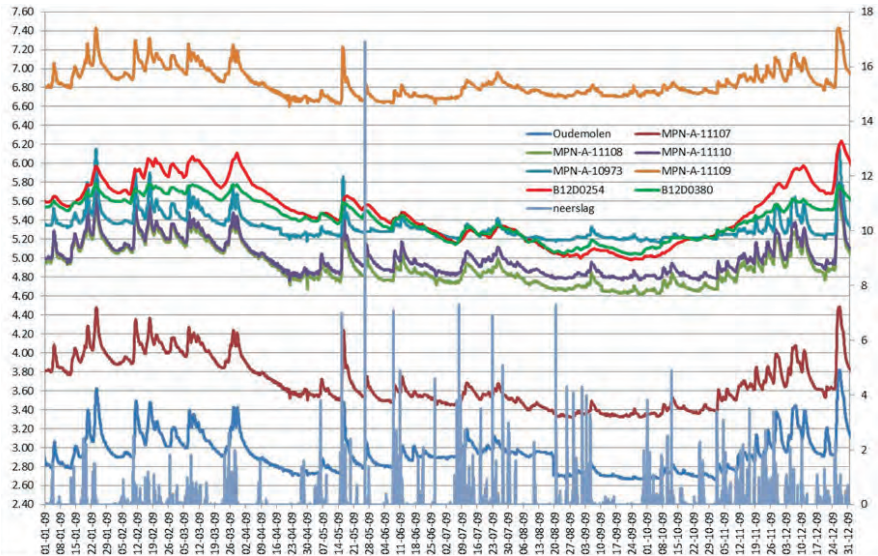
### Beeld van de toestand

Voor elk van de onderscheiden trajecten wordt een beeld geschetst van de toestand aan de hand van de milieufactoren met betrekking tot de hydromorfologie: het waterpeil, de stroomsnelheid en het bodemsubstraat.

#### Waterpeil

- Verzamel informatie over het *waterpeil*. Gebruik hiervoor de peilregistraties bij stuwen, inlaatpunten, gemalen, etc. Bekijk de verzamelde waterstanden en zet deze uit in een grafiek (tijd op de x-as, zie bijvoorbeeld figuur 4.3).
- Beoordeel het *peilregime*. Is er sprake is van een natuurlijk peil (het peil volgt de afvoer) of dat er sprake is van een vast peil of tegennatuurlijk peil (gestuurd).
- Breng de trajecten die regelmatig droogvallen in beeld. Waar is sprake van droogval en waar niet? Welke trajecten kunnen meer dan een week droogvallen (in een droog jaar)? Pas hier eventueel de indeling in traject op aan.

**FIG 4.3 GEMETEN WATERPEILEN EN STIJGHOOGTEN OP VERSCHILLENDE LOCATIES IN HET GASTERENSE DIEP IN RELATIE TOT DE NEERSLAG**



### Stroomsnelheid

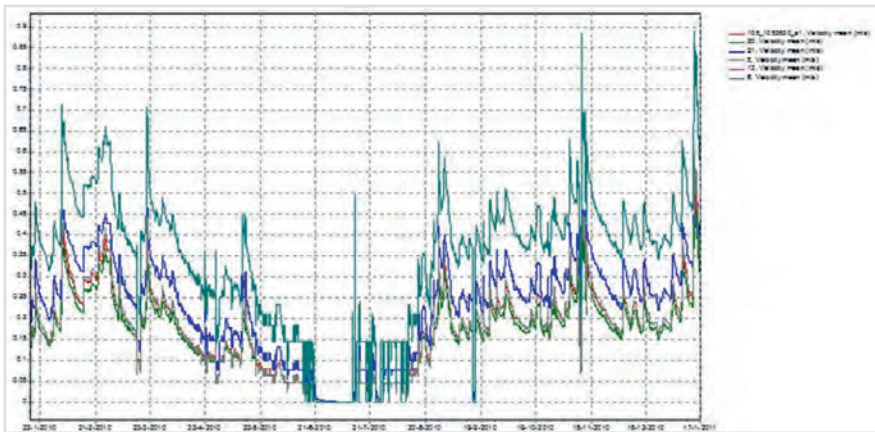
- Verzamel informatie over de stroomsnelheid. Bekijk de gemeten stroomsnelheden en zet deze indien mogelijk uit in een grafiek (tijd op de x-as, zie bijvoorbeeld figuur 4.4).
- Bereken of schat de *gemiddelde stroomsnelheid in de zomerperiode* (juli-augustus-september).

In de praktijk worden er niet zo vaak stroomsnelheden gemeten. Toch zijn er meestal wel metingen beschikbaar, bijvoorbeeld in het kader van biologische bemonsteringen (waterplanten, macrofauna, vissen), genoteerd op veldformulieren, of projecten. Een andere bron van informatie is de kennis bij bemonsteraars en veldmedewerkers: waar stroomt het vrijwel altijd, waar valt de stroming weg in de zomer of valt het zelfs droog? Waar stroomt het hard tijdens afvoerpieken?

Ook een waterbewegingsmodel vormt een goede bron van informatie voor de stroomsnelheid, vooral als deze geschikt/gekalibreerd is voor het uitvoeren van

een jaarrondberekening (zie kader 'gebruik van informatie uit modellen'). Bereken in dat geval de stroomsnelheid gedurende het jaar voor verschillende locaties in het stroomgebied, zie bijvoorbeeld **figuur 4.4**. Vaak zal het model voor een ander specifiek doel zijn gemaakt, bijvoorbeeld voor de NBW-toetsing. Dan is het model niet zonder meer geschikt voor een jaarrondberekening. In dat geval kunnen kortere perioden worden berekend of kan men het model voor dit doel aanpassen.

**FIG 4.4 BEREKENDE (GEMIDDELTE) STROOMSNELHEID OP VERSCHILLENDE LOCATIES IN DE HOOG E RAAM, GEDURENDE EEN JAAR**



Een alternatief is het berekenen van de stroomsnelheid op locaties met een (berekende) afvoerreeks, gemeten waterpeil (jaarrond) en gemeten dwarsprofiel, bijvoorbeeld door middel van een script in Matlab. Deze methode is alleen geschikt voor de situaties waarin het waterpeil (en de stroomsnelheid) rond de meetlocaties representatief is voor de waterloop. Metingen van het waterpeil zijn meestal gebonden aan stuwen en daardoor vaak minder representatief.

---

### *Bodemsubstraat*

- Verzamel ten slotte informatie over het bodemsubstraat.
- Is er sprake van een *gevarieerd bodemsubstraat*? Dit aspect is voor zover bekend niet geoperationaliseerd in een toetsbare parameter. Als werkhypothese wordt in dit rapport aangenomen dat er sprake is van een gevarieerd bodemsubstraat als er *gedurende het hele jaar* minstens drie van de volgende substraten op relatief korte afstand van elkaar (enkele meters) aanwezig zijn: zand, grind, bladpakket, hout, en planten. Bij een substraat dat vrijwel alleen bestaat uit zand ('zandwoestijn'), blad, een (dun) laagje slib of planten is er geen sprake van een gevarieerd bodemsubstraat. Zijn er grote verschillen binnen het traject?

In de praktijk is er niet zo veel informatie beschikbaar over het bodemsubstraat. Toch zijn er meestal wel metingen beschikbaar, bijvoorbeeld in het kader van biologische bemonsteringen, projecten of kennis bij bemonsteraars en veldmedewerkers, zie onder 'stroomsnelheid'.

---

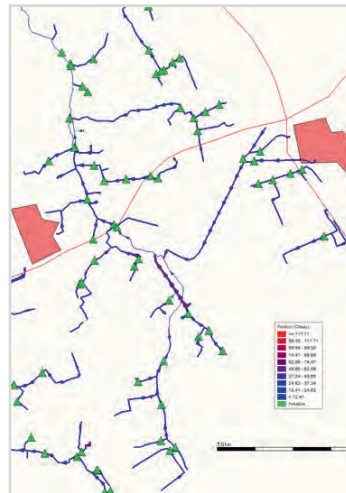
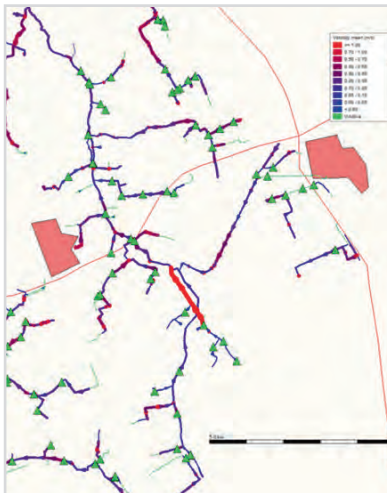
## **KADER** **GEbruik VAN INFORMATIE UIT MODELLEN**

Modellen vormen vaak een goede bron van informatie voor het verkrijgen van een eerste beeld van de toestand (waterpeil en stroomsnelheid) en de factoren die deze toestand verklaren (waterlopenstelsel, afvoer, verhang, dwarsprofiel en de aanwezigheid van stuwen en plantengroei (weerstand)). Hierbij kan zowel de ruimtelijke variatie (zie figuur in dit kader) als de temporele variatie worden bestudeerd (zie *figuur 4.4*).

Hierbij is het van groot belang om na te gaan hoe goed het model het systeemgedrag beschrijft. Een goede graadmeter daarvoor is een jaarrondberekening. Deze dient dan met het bestaande model worden verricht voor een periode waarvan men betrouwbare metingen heeft (neerslag en afvoer). Uit de vergelijking van de modelresultaten en de metingen blijkt de kwaliteit van beide.

---

Waterbodenverslag (linksboven), ruwheid (rechtsboven), gemiddelde afvoer (linksonder) en gemiddelde stroomsnelheid (rechtsonder) in het Sobek-model van het Gasterense diep (rood=hoog; blauw=laag).



#### 4.4 EVALUATIE

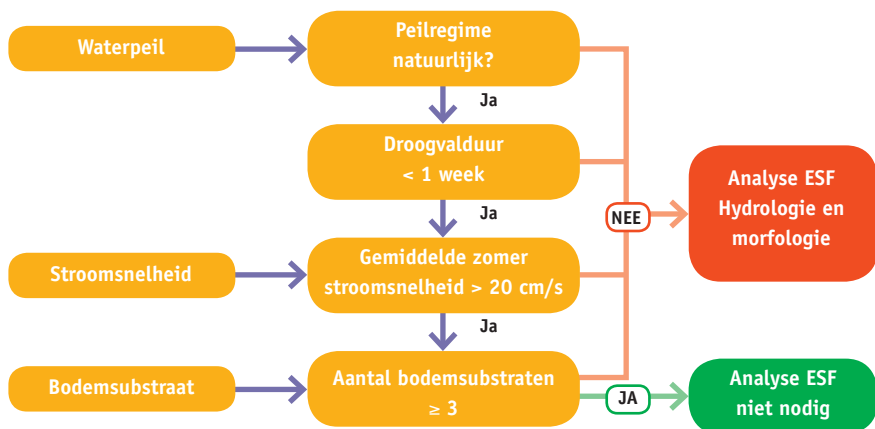
Evalueer vervolgens voor elk traject of het beeld van de huidige toestand een aanleiding vormt voor een globale analyse van de hydrologie en morfologie. Maak hiervoor gebruik van de grenswaarden in tabel 4.1 en het beslisschema in figuur 4.5.

**TABEL 4.1 CRITERIA EN GRENSWAARDEN VOOR DE MILIEUFACTOREN MET BETREKKING TOT HYDROMORFOLOGIE**

TOESTANDBEPALING		
Milieufactor	Criterium	Grenswaarde
Waterpeil	Aanwezigheid van een natuurlijk peilregime (peil volgt afvoer)	Ja <sup>1</sup>
	Droogvalduur	< 1 week <sup>2</sup>
Stroomsnelheid	Gemiddelde zomer stroomsnelheid (juli-augustus-september)	> 20 cm/s <sup>3</sup>
Bodemsubstraat	Gevarieerd bodemsubstraat	> 3 substraten <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Evers en Schipper, 2016  
<sup>2</sup> Nöges et al., 2014; Verdonschot en Soons, 2016 (REFRESH)  
<sup>3</sup> STOWA, 2018-28; Verdonschot en van den Hoorn, 2005; Kroes et al., 2007. Zie toelichting in § 7.6  
<sup>4</sup> Zie toelichting in de tekst

**FIG 4.5 BESLISSCHEMA OM TE BEPALEN OF EEN GLOBALE ANALYSE MET ECOLOGISCHE SLEUTELFACTOREN VOOR HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE NODIG IS**





---

## H5 GLOBALE ANALYSE



---

In de globale analyse worden alle relevante ESF's geanalyseerd. Het uitvoeren van de globale analyse levert voldoende kwantitatief inzicht in het functioneren van het ecosysteem, welke factoren domineren bij (het verklaren van) de huidige ecologische toestand en welke factoren van belang zijn om te wijzigen indien een andere ecologische toestand gewenst is. Daarbij wordt gebruik gemaakt van eenvoudig toepasbare rekenregels (vuistregels) of grenswaarden.

## 5.1 AFVOERDYNAMIEK (ESFR-AFVOERDYNAMIEK) EN GRONDWATER (ESFR- GRONDWATER)

### Betekenis (STOWA, 2015-W06)

Met de afvoerdynamiek wordt de variatie in de afvoer bedoeld. In de natuurlijke situatie wordt een groot deel van de neerslag vastgehouden in het stroomgebied en komt het gelijkmatig tot afstroming. In stroomgebieden met een grote menselijke beïnvloeding wordt het water over het algemeen versneld afgevoerd met een hogere afvoer in natte perioden en een lagere afvoer in drogere perioden tot gevolg. Ook puntbronnen kunnen van invloed zijn op de afvoer en de afvoerdynamiek, denk aan onttrekkingen en rioolwaterzuiveringsinstallaties.

De grondwaterstroming heeft een belangrijke relatie met de afvoerdynamiek en dan vooral de basisafvoer, maar wordt apart benoemd omdat het een belangrijke factor is die specifiek aandacht behoeft. De invloed van lokale grondwaterstromen op de afvoerdynamiek is afhankelijk van de ligging in het stroomgebied: in benedenstroomse richting neemt het relatieve aandeel van het grondwater steeds verder af. Over het algemeen hebben menselijke ingrepen tot een daling van de grondwaterstand en een afname van kwel naar de waterloop geleid. Bij de grote rivieren hebben de aanpassingen plaatselijk geleid tot rivierkwel naar omliggend gebied, vooral tijdens hoogwaterperioden.

### Analyse en grenswaarden

De analyse van de sleutelfactor afvoerdynamiek en het grondwater richt zich op de aspecten die voor de levensgemeenschappen van stromende wateren van belang zijn. Dat zijn vooral:

- De variatie van de afvoer in de tijd en de timing.
- De kans op extreme afvoerpieken waarbij grote verstoring van habitats kan optreden.
- De permanentie van de afvoer.

De eerste stap in de analyse is een zorgvuldige controle van de peil- en debiet-meetreeksen (Wolfs en Willems, 2018a). Op basis van de gecontroleerde meetreeksen worden enkele eenvoudige parameters berekend met betrekking tot de afvoerdynamiek. Voor een toelichting op deze parameters zie ook § 7.2. De gehanteerde criteria en grenswaarden zijn weergegeven in tabel 5.1.

**TABEL 5.1 CRITERIA EN GRENSWAARDEN VOOR DE AFVOERDYNAMIEK EN HET GRONDWATER**

AFVOERDYNAMIEK EN GRONDWATER		
Parameter	Criterium	Grenswaarde
Debietfluctuatie	Annual coëfficiënt of flow	< 30 <sup>1</sup>
	Piekafvoer (T=1)/gemiddeldevoorjaarsafvoer (april/mei)	< 4 <sup>2</sup>
	Duur van periode zonder afvoer	< 1 maand <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Poff and Ward, 1989; STOWA, 2014-15. Zie toelichting in § 7.2  
<sup>2</sup> Evers en Schipper, 2016; STOWA, 2017-05. Zie toelichting in § 7.2  
<sup>3</sup> Verdonschot en Soons, 2016 (REFRESH)

### Data: verzamelen en controleren van de gegevens

#### Selectie van meetpunten

- Bekijk de ligging van meetpunten met oppervlaktewaterstanden en debieten in het stroomgebied of traject van interesse. Beschouw ook de (meet) punten op inlaatpunten, bij gemalen, etc. Vergeet ook poldergebieden niet die bemalen worden. Selecteer de relevante meetpunten.
- Bekijk de ligging van de KNMI-neerslagstations en overige neerslag-meetpunten (bijvoorbeeld op RWZI's of lokale meetpunten). Selecteer de meetpunten in de nabije omgeving van het stroomgebied.
- Bekijk de ligging van grondwater-meetpunten (peilbuizen) in het stroomgebied (DINO-loket en/of geo-informatiesysteem van het waterschap). Selecteer de meetpunten in de nabije omgeving van het stroomgebied.

#### Verzamel de tijdreeksen (metingen) van hydro-meteorologische variabelen

- Neerslag (idealiter uur-registraties of nauwkeuriger);
- (Potentiële) verdamping;
- Oppervlaktewaterpeilen;

- 
- Debieten;
  - Klepstanden van stuwen;
  - Grondwaterpeilen.

Eventueel kunnen parameters rechtstreeks overgenomen worden uit modellen (Wolfs en Willems, 2018a).

#### *Controle van peil- en debietmeetreeksen*

Bij de bestudering van de meetreeksen van peilen en afvoeren blijkt vaak dat er perioden zijn waarin merkwaardige afwijkingen en patronen kunnen worden gesignaleerd. In dat geval dient de meetreeks te worden gecontroleerd. De controle kan worden gedaan door onderlinge vergelijking van meetreeksen, de vergelijking met de neerslag en/of vergelijking met modelresultaten. Daarbij dient goed te worden bestudeerd waar en hoe de metingen zijn verricht en dient bij stuwen extra aandacht te worden besteed aan de correctie voor verdrinking en de effecten van klepbewegingen.

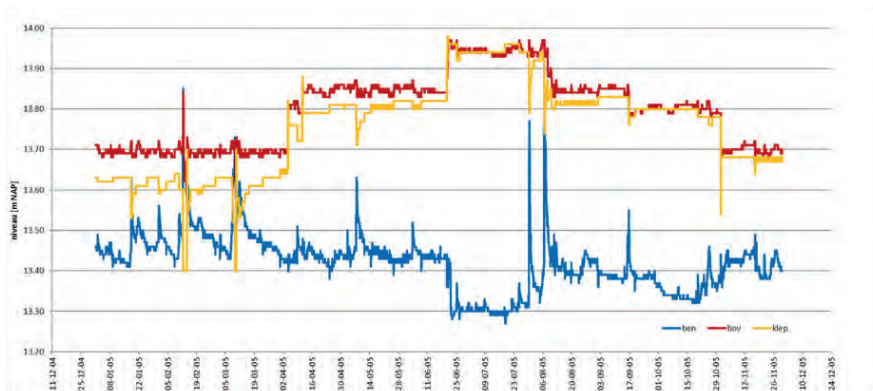
- Zet de gemeten oppervlaktewaterpeilen uit in één figuur met de neerslaggegevens, zie bijvoorbeeld figuur 4.3.
- Zet de gemeten grondwaterstanden samen met de relevante oppervlaktewaterpeilen uit in één figuur met de neerslaggegevens, zie bijvoorbeeld figuur 4.3.
- Zet voor de (geautomatiseerde) stuwen de gemeten oppervlaktewaterpeilen (boven en beneden) uit in één figuur met de klepstanden, zie bijvoorbeeld figuur 5.1.
- Zet voor de vaste debietmeetpunten (ADCP) de gemeten debieten uit in één figuur met de gemeten oppervlaktewaterpeilen.
- Zet de gemeten of (her)berekende debieten uit in één figuur met de neerslaggegevens (eventueel ook verdamping), zie bijvoorbeeld figuur 5.2.

Controleer op:

- Het afnemen van de waterpeilen (debieten: toenemen) in stroomafwaartse richting.
- Het patroon van de waterpeilen en debieten in stroomafwaartse richting. Afwijkende patronen tussen meetpunten kunnen wijzen op meetfouten, maar ook het gevolg zijn van aanvoer of onttrekkingen van water of de groei van waterplanten.

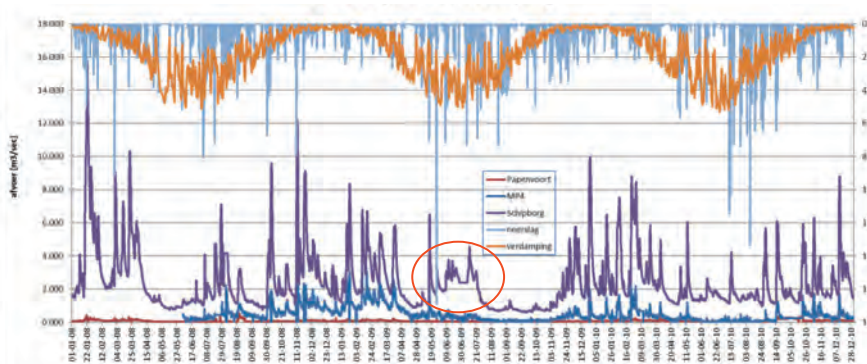
**FIG 5.1 GEMETEN WATERSTANDEN BIJ STUW PAPENVOORT IN DE OOSTTAK VAN DE DRENTSCHE AA (ANDERENSE DIEP)**

*Boven (rood) en beneden (blauw), de stuw en klepstanden (geel).*



**FIG 5.2 AFVOER PAPENVOORT MP4 SCHIPBORG**

*Vergelijking van de debietmetingen bij Papenvoort, MP4 (oosttak Drentsche Aa) en Schipborg (stroomafwaarts in Drentsche Aa) in 2008 t/m 2010 in relatie tot neerslag en verdamping. De metingen bij Schipborg in juni 2009 (rode cirkel) zijn verdacht: op basis van de neerslag en de verdamping is niet te verklaren waarom het debiet zo lang zo hoog blijft.*



- Het consistent voorkomen van meetwaarden in de meetperioden. Een periode zonder metingen voor een bepaald meetpunt kan wijzen op meetfouten. Bij (geautomatiseerde) stuwen kan het ontbreken van peilen of klepstanden leiden tot fouten in de berekende debieten.
- Het niet toenemen van peilen en debieten tijdens perioden zonder neerslag.
- Het voorkomen van afwijkende meetwaarden of -perioden. Periodiek hogere of lagere metingen kunnen het gevolg zijn van een gewijzigd peilregime (zie ook verderop), maar ook wijzen op een structurele meetfout.
- Klepbewegingen ('klepdynamiek') in relatie tot het bovenstroomse peil en berekende afvoeren. Let op of klepbewegingen tot (piek)afvoeren leiden (plotselinge klepdalingen) of tot het bergen van water in de waterloop (plotselinge klepstijgingen).
- 'Verdrinking' van de stuw; dit gebeurt wanneer de benedenstroomse waterstand bij de stuw ( $h_2$ ) de bovenstroomse waterstand ( $h_1$ ) beïnvloedt. Corrigeer indien nodig het berekende debiet voor verdrinking (zie STOWA, 2009-41). N.B. Een correctie voor verdrinking leidt vaak tot een (forse) reductie van de berekende piekafvoeren, zie bijvoorbeeld figuur 5.3. Dit is bijvoorbeeld relevant voor de berekening van de geulvormende afvoer.
- Houd bij klepstuwen ook rekening met andere complicerende factoren, zie § 7.2 ('meten van de afvoer').
- De interactie tussen het grondwater- en oppervlaktewaterpeil (al dan niet in relatie tot de aangeleverde kwelkaarten).

Corrigeer indien nodig de debiet-meetreeks of selecteer een geschikte periode voor de berekening van de statistieken en toetswaarden.

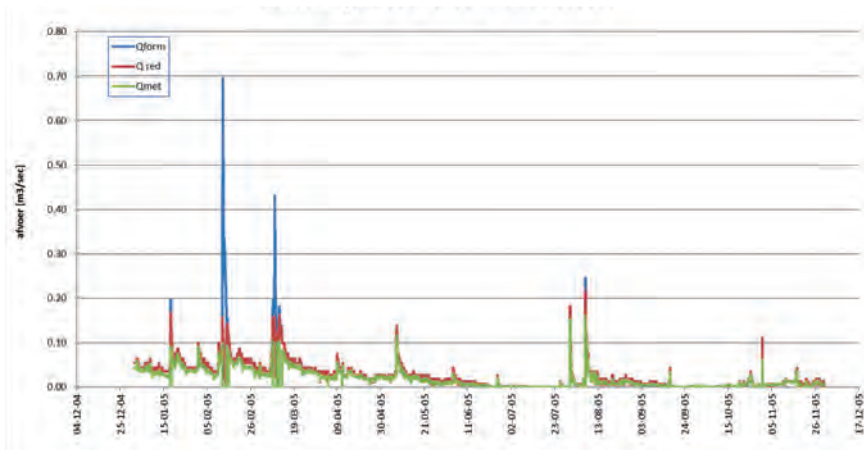
#### *Controle van neerslagegegevens*

- Vergelijk de cumulatieve neerslagvolumes van de gebruikte stations en naburige stations. Bij het optreden van (grote) verschillen moet goed gekeken worden naar de representativiteit van de geselecteerde meetstations voor de neerslag in het stroomgebied.
- Voor langere neerslagmetingen kan een extreme waarden analyse uitgevoerd worden. De neerslagextremen van buien die meer frequent voorkomen (bijvoorbeeld jaarlijks uit een 20-jarige meetreeks) moeten dicht aansluiten. Een dergelijke analyse kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd met Wetspro (bepalen van onafhankelijke extreme periodes: de POT selectie (Peak-over-threshold)) (Wolfs en Willems, 2018a).

---

### FIG 5.3 AFVOER PAPENVOORT ZONDER EN MET REDUCTIE

Berekende debieten ( $m^3/s$ ) op meetpunt Papenvoort (oosttak Drentsche Aa) in 2005 op basis van de waterpeilen boven- en benedenstrooms en de klephoogte van de stuw. De blauwe lijn is berekend met de stuwformule zonder correctie voor verdrinking, rood met correctie voor verdrinking, groen is geleverd door het waterschap.





---

## **KADER** GEEN MEETGEGEVENS, WAT DAN?

Het kan voorkomen dat er geen meetgegevens van waterstanden en debieten beschikbaar zijn of geen meetgegevens van het deelgebied (of traject) van interesse. Mogelijke oplossingen:

- Uitvoeren van aanvullende metingen (afvoeren of waterpeil). Het instellen van een tijdelijk waterpeil-meetpunt in het traject van interesse is alleen zinvol in combinatie met een benedenstrooms afvoermeetpunt en een waterbewegingsmodel of in combinatie met een lange en zeer goed gevalideerde meetreeks in de nabijheid.
- Een groter stroomgebied beschouwen en dan de afvoer herleiden naar deelgebieden via het bepalen van de afwaterende gebieden (in ha) in combinatie met afvoercoëfficiënten (de zogenaamde 'rationele methode'). N.B.: om deze analyse te kunnen controleren (of de resultaten aannemelijk te maken), zijn ook aanvullende meetgegevens nodig (STOWA, 2017-05).
- Het genereren van een debietmeetreeks op basis van een gekalibreerd hydrologisch model (bijvoorbeeld voor een groter of vergelijkbaar gebied), zie bijlage C en de tekst hieronder. N.B.: Een toetsing op basis van meetgegevens heeft altijd de voorkeur.

---

### **Data: het opstellen van een waterbalans (hydrologische analyse)**

Een goede manier om de gemeten debieten te controleren en meer grip te krijgen op de waterstromen in het stroomgebied, is het opstellen van een waterbalans ofwel het uitvoeren van een hydrologische analyse. Er zijn verschillende methoden voor het uitvoeren van een hydrologische analyse, zie § 6.1 en bijlage C.

In een hydrologische analyse wordt de bijdrage van de verschillende aan- en afvoerposten van water in het watersysteem bepaald. Belangrijk zijn neerslag en verdamping, oppervlakkige toestroom van ondiep grondwater, aanvoer van diep grondwater, wegzijging en de inlaat en aflaat van oppervlaktewater. Naast een controle op de meetreeksen vormt een hydrologische analyse de basis voor de hydraulische modellering (onder andere bepaling van de waterpeilen en stroomsnelheden) en voor de stoffenbalans: de aan- en afvoer van water en de kwaliteit daarvan vormen belangrijke posten op de stoffenbalans.

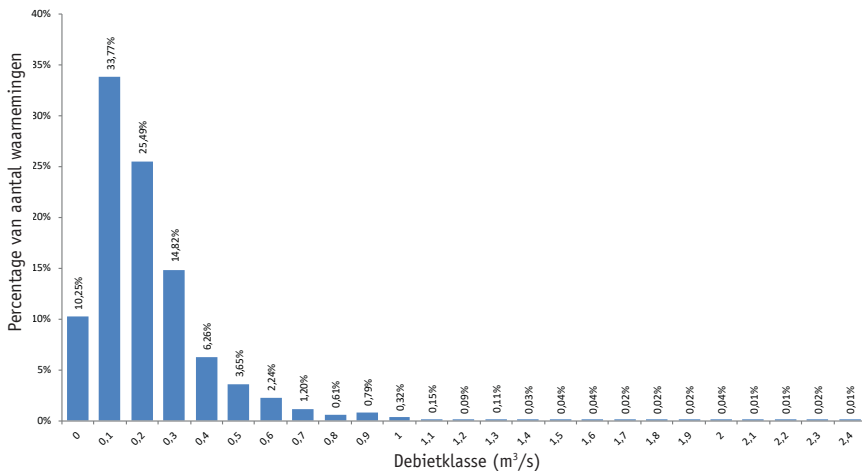
Voor de beoordeling van de sleutelfactor afvoerdynamiek en grondwater is het niet noodzakelijk om een hydrologische analyse uit te voeren. Wel wordt aanbevolen om ter ondersteuning van de analyse een start te maken met een hydrologi-

sche analyse, bijvoorbeeld in de vorm van een eenvoudige waterbalans (zie bijvoorbeeld de rekentool waterbalansen in [bijlage C](#) en STOWA, 2015-17).

### Berekening van statistieken en toetswaarden

- Bereken of bepaal de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer ( $T=1$ ).
- Bereken de 'annual coëfficiënt of flow'. Dit is de jaargemiddelde afvoer gedeeld door de standaarddeviatie \* 100 (Poff en Ward, 1989). Voor een toelichting zie ook § 7.2.
- Of: deel de jaarlijkse piekafvoer ( $T=1$ ) door de gemiddelde afvoer in april en mei. Voor een toelichting zie ook § 7.2.
- Zet de afvoer uit als functie van de tijd, zie bijvoorbeeld [figuur 5.3](#). Bepaal de lengte van de perioden zonder afvoer (afvoer = 0). Maak ter ondersteuning een frequentieverdeling van de afvoer, zie bijvoorbeeld [figuur 5.4](#). Maak hierbij een aparte debietklasse voor de afvoer = 0.

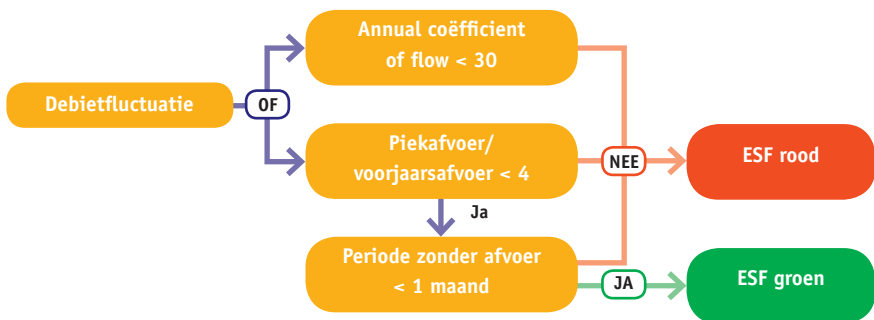
**FIG 5.4 FREQUENTIEVERDELING VAN DE AFVOER (IN  $m^3/s$ ) VOOR DE GRASPEELLOOP IN HET STROOMGEBIED VAN DE HOOGHE RAAM**



### Beoordeling ESF

Beoordeel aan de hand van het beslisschema in [figuur 5.5](#) of de ESF afvoerdynamiek en grondwater in orde zijn (ESF groen) of niet (ESF rood). Gebruik hiervoor de analyse en grenswaarden zoals hierboven toegelicht. Voor de debietfluctuatie geldt dat òf de ‘annual coëfficiënt of flow’ òf de piekafvoer /voorjaarsafvoer aan de grenswaarde moet voldoen.

FIG 5.5 **BELISSCHEMA VOOR DE ESF AFVOERDYNAMIEK EN GRONDWATER**



## 5.2 STAGNATIE (ESFR-STAGNATIE) EN WATERPLANTEN (ESFR-WATERPLANTEN)

### Betekenis (STOWA, 2015-W06)

Stagnatie en de ontwikkeling van planten in de waterloop hebben beide betrekking op de factor ‘weerstand’. Verhoging van de weerstand leidt tot verhoging van het waterpeil en een afname van de stroomsnelheid.

Stagnatie is de afwezigheid van stroming in de waterloop. Stagnatie komt van nature vooral voor bij grote obstakels zoals bomen, beverdammen, zandbanken of bij eenzijdig aangetakte oude meanders. In grotere riviersystemen komt stagnatie van nature voor als onderdeel van het continuüm van permanent stromende geulen, tijdelijk meestromende geulen tot en met geïsoleerde uiterwaardwateren. In stroomgebieden met een grote menselijke beïnvloeding hangt stagnatie meestal samen met verstuwung van de waterloop. De effecten van verstuwung worden vaak versterkt door een veranderde hydrologie en kanalisatie (vooral overdimensionering).

---

Onder invloed van licht, stromingscondities, waterpeil, het bodemsubstraat en nutriënten kunnen planten tot ontwikkeling komen. Dit kunnen zowel waterplanten als oeverplanten zijn (voor het gemak wordt hier gesproken van planten). Net als de bovengenoemde natuurlijke en onnatuurlijke grote barrières zorgt de groei van planten voor weerstand in de bedding en daarmee voor opstuwing bij de aan- en afvoer van water.

Weerstand werkt direct door in het stromingsregime en daarmee in het zuurstofregime in de waterloop. Daarnaast zorgt stagnatie voor sedimentatie van fijn (organisch) materiaal en een uniform substraat. Bij voldoende licht en nutriënten kan de waterkolom (verder) volgroeien met planten.

### **Analyse en grenswaarden**

De analyse van de sleutelfactoren stagnatie en waterplanten (aspect weerstand) spitst zich toe op het vóórkomen van onnatuurlijke barrières en (dominante) groei van planten in de bedding. In de analyse wordt gekeken waar barrières en dominante groei van planten in de bedding voorkomt en welk deel van de waterloop (traject) hierdoor wordt beïnvloed. De gehanteerde parameters, criteria en grenswaarden zijn weergegeven in [tabel 5.2](#).

---



*Beverdam in de Hooge Raam zorgt voor extra opstuwing (foto: Roy Laseroms januari 2018).*

**TABEL 5.2 CRITERIA EN GRENSWAARDEN VOOR STAGNATIE EN WATERPLANTEN (ASPECT WEERSTAND) IN DE BEDDING**

STAGNATIE EN WATERPLANTEN (WEERSTAND)		
Parameter	Criterium	Grenswaarde
Barrières	Barrières aanwezig	Nee <sup>1</sup>
	% van waterloop onder invloed van barrières	< 25% <sup>1</sup>
Planten	Bedding groeit vol met planten	Nee <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Evers en Schipper, 2016  
<sup>2</sup> Meire et al., 2014

*Barrières en planten*

- Bekijk de kaart van het watersysteem (zie figuur 4.1). Zijn er stuwen of andere barrières aanwezig in de waterloop? Gebruik hierbij ook de informatie van de veldmedewerkers en het veldbezoek.
- Verzamel informatie over de groei van planten in de bedding en het onderhoud. Gebruik hiervoor de informatie uit de quickscan (§ 4.3). Zijn er locaties in de waterloop waar de bedding dichtgroeit met planten of zonder onderhoud dicht zou groeien (patroon 1 in figuur 5.6)? Zijn er plekken waar (veel) onderhoud plaatsvindt om dichtgroeien van de bedding te voorkomen?
- Bepaal de invloedssfeer van de barrières en de plantengroei. Welk deel van de waterloop is vrij afwaterend en welk deel wordt opgestuwd als gevolg van barrières en/of plantengroei (waterspiegel vrijwel vlak)? Beschouw hierbij de (gemiddelde) zomersituatie zonder onderhoud. Gebruik hiervoor de informa-

**FIG 5.6 VOORBEELDEN VAN VEGETATIEPATRONEN IN WATERLOPEN (GESTILEERD) (MEIRE ET AL., 2014)**

Breng voor de planten in kaart waar de waterloop dicht groeit (of zonder onderhoud dicht zou groeien) volgens patroon 1 ('vol').

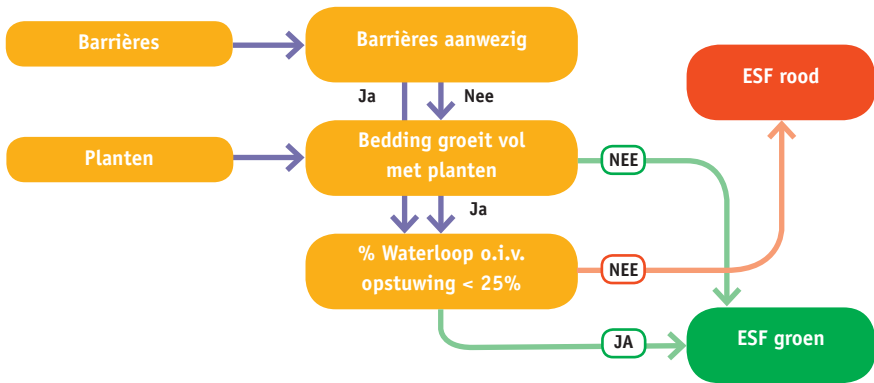


tie van veldmedewerkers of de resultaten van een waterbewegingsmodel. Bereken het percentage van de waterloop dat onder invloed staat van barrières en/of plantengroei.

### Beoordeling ESF

Beoordeel aan de hand van het beslisschema in [figuur 5.7](#) of de ESF stagnatie en waterplanten in orde zijn (ESF groen) of niet (ESF rood). Gebruik hiervoor de analyse en grenswaarden zoals hierboven toegelicht.

**FIG 5.7** BESLISSCHEMA VOOR DE ESF STAGNATIE EN WATERPLANTEN



### 5.3 NATTE DOORSNEDE (ESFR-NATTE DOORSNEDE)

#### Betekenis (STOWA, 2015-W06)

Met de natte doorsnede wordt het dwarsprofiel bedoeld van insteek tot insteek (hoogste punt van de oever). Het dwarsprofiel wordt onder natuurlijke omstandigheden gevormd door de afvoer (afvoerdynamiek), het bodemverhang en de samenstelling van het bodem- en oevermateriaal. Daarnaast is de ontwikkeling van de vegetatie in het water en de oever van belang voor de ontwikkeling van het dwarsprofiel. Een belangrijk aspect van de natte doorsnede is de breedte-diepte verhouding.

Het dwarsprofiel is vaak beïnvloed als gevolg van veranderingen in de afvoer (dynamiek), kanalisatie en scheepvaart, overkluisingen en duikers en onderhoud. In de regel is het dwarsprofiel hierdoor verbreed en verdiept. Een vergroot dwars-



profiel is via het stromingsregime en daarmee de substraatvariatie, de groei van waterplanten en het bijbehorende zuurstofregime van invloed op de levensomstandigheden voor aquatische organismen.

### Analyse en grenswaarden

De analyse van de natte doorsnede richt zich op het geulpatroon en het dwarsprofiel. In de analyse wordt bekeken of het geulpatroon (recht of meanderend) en het dwarsprofiel bij de omstandigheden passen (afvoer, verhang en samenstelling van het bodem- en oevermateriaal). Als het geulpatroon en het dwarsprofiel hier te ver van afwijken, zorgt dit in de regel voor problemen met de stabiliteit van de oevers, de stroomsnelheid (te laag en/of te hoog) en het bodemsubstraat (uniform bodemsubstraat). Dit is bijvoorbeeld het geval bij overdimensionering van de waterloop en in situaties waar er een slingerende loop is aangelegd op plekken met onvoldoende afvoer of verhang. De gehanteerde parameters, criteria en grenswaarden zijn weergegeven in tabel 5.3.

**TABEL 5.3 CRITERIA EN GRENSWAARDEN VOOR DE NATTE DOORSNEDE VAN DE BEDDING**

NATTE DOORSNEDE		
Parameter	Criterium	Grenswaarde
Geulpatroon	Natuurlijk geulpatroon	Ja <sup>1</sup>
Dwarsprofiel	Overdimensionering	Ja <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Expert judgement, zie toelichting in de tekst en in § 7.4*

Voor het bepalen van het geulpatroon en de dimensies van de dwarsdoorsnede (breedte en diepte) van geulen in een evenwichtssituatie wordt (onder andere) gebruik gemaakt van formules en diagrammen uit het handboek geomorfologisch beekherstel (STOWA, 2015-02). Bij het gebruik van de hydraulische geometrie relaties en empirische formules in het algemeen gelden enkele belangrijke beperkingen, zie onder andere § 7.4. De formules zijn beschikbaar via een formuleblad<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> <https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-geomorfologisch-beekherstel-leidraad-voor-een-stapsge-wijze-en-integrale>

---

### Geulpatroon

Onder natuurlijke omstandigheden ontstaat het geulpatroon als gevolg van de afvoer, het dalverhang en de samenstelling van het bedding- en oevermateriaal (STOWA, 2015-02). Het is lastig om op basis van één criterium te bepalen of er sprake is van een natuurlijk geulpatroon of niet. Hiervoor kunnen de volgende indicaties worden gebruikt:

- De positie in het stabiliteitsdiagram op basis van het potentieel specifiek stromingsvermogen en de mediane korrelgrootte van het beddingmateriaal (D50):
  - Bereken het potentieel specifiek stromingsvermogen op basis van de geulvormende afvoer, het dalverhang en de waarde voor coëfficiënt  $a$  volgens formule (1a). Deze formule ontstaat door combinatie van formule (1) en (2) uit het handboek geomorfologisch beekherstel:

---

$$\omega = \rho * g * \sqrt{Q * S} / a \quad (\text{Formule 1a})$$

---

Waarbij:

$\omega$  = specifiek stromingsvermogen ( $W/m^2$ )

$\rho$  = dichtheid van water =  $1.000 \text{ kg/m}^3$

$g$  = zwaartekrachtversnelling =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$Q$  = geulvormende afvoer ( $m^3/s$ ), zie hiervoor het resultaat uit § 5.1

$S$  = dalverhang ( $m/m$ ; -), zie hiervoor het resultaat uit § 4.3

$a$  = coëfficiënt voor de breedte van een referentiegeul. Voor geulen met een zandig beddingmateriaal geldt  $a = 4,7$ ; voor geulen met grindig beddingmateriaal geldt

$a = 3,0$ . De grens tussen zandig en grindig beddingmateriaal ligt bij een mediane korrelgrootte (D50) van 2 mm, zie ook § 7.7.

- Bepaal het passende geulpatroon op basis van het berekende potentieel specifiek stromingsvermogen en de mediane korrelgrootte van het beddingmateriaal (D50) door middel van het stabiliteitsdiagram in het handboek geomorfologisch beekherstel (p.55). Maak hierbij eventueel gebruik van het bovengenoemde formuleblad.
- Vergelijk -indien van toepassing- de huidige meanderlengte en -amplitude met de passende meanderlengte en -amplitude. Bereken hiervoor de meanderlengte en -amplitude volgens formule (6) en (8) uit het handboek geomorfologisch beekherstel.

- 
- Vergelijk het huidige patroon met het passende patroon (recht/ meanderend/ vlechtend). Is het geulpatroon passend bij de omstandigheden?
  - Het *historisch geulpatroon* als referentie. Vergelijk het huidige patroon met het historisch patroon en bekijk of er grote, onnatuurlijke veranderingen in het geulpatroon zijn opgetreden. Gebruik hiervoor oude kaarten (liefst van vóór 1960/ 1970, de periode van grootschalige ingrepen in de waterhuishouding). Bedenk wel dat er in het verleden vaak sprake was van een ander afvoerpatroon dan in de huidige situatie of dat er andere aanleidingen waren voor de start van het meanderproces (bijvoorbeeld kwel of de aanvoer van zand door de wind). Hierdoor is het meanderpatroon uit het verleden niet altijd een goede afspiegeling voor het passende patroon in de huidige situatie. Bovendien zijn er veelal ook (ver) voor de periode 1960/ 1970 grote ingrepen in de waterhuishouding geweest, zoals bedijkingen en bochtafsnijdingen.
  - In de praktijk zijn er vaak natuurlijke *lokale omstandigheden* die het geulpatroon beïnvloeden, zoals onregelmatigheden in de ondergrond (aanwezigheid van veen of leem), kwel in de oeverzone of de begroeiing. Beschouw de lokale situatie en beoordeel in hoeverre deze van invloed is (geweest) op het geulpatroon en of deze de huidige situatie kan verklaren.

### Dwarsprofiel

Onder natuurlijke omstandigheden zijn het dwarsprofiel en de bodemligging van stromende wateren in een dynamisch evenwicht met de afvoer en het sedimenttransport. Als gevolg hiervan kan het dwarsprofiel in tijd en ruimte variëren. Hierdoor is het lastig om zonder nader onderzoek vast te stellen of er sprake is van overdimensionering of niet.

Hiervoor kunnen de volgende indicaties worden gebruikt:

- De *historische breedte en diepte* als referentie. Gebruik hiervoor oude leggerprofielen en historische informatie (liefst van vóór 1960/ 1970, de periode van grootschalige ingrepen in de waterhuishouding). Leid af of de waterloop is verbreed en verdiept ten behoeve van scheepvaart, om sneller water af te voeren, als gevolg van onderhoud ('uitkrabben') en dergelijke. Ter illustratie kunnen de veranderingen van het dwarsprofiel ten opzichte van een 'referentie' (berekend of historisch) worden geïllustreerd aan de hand van het verloop van de

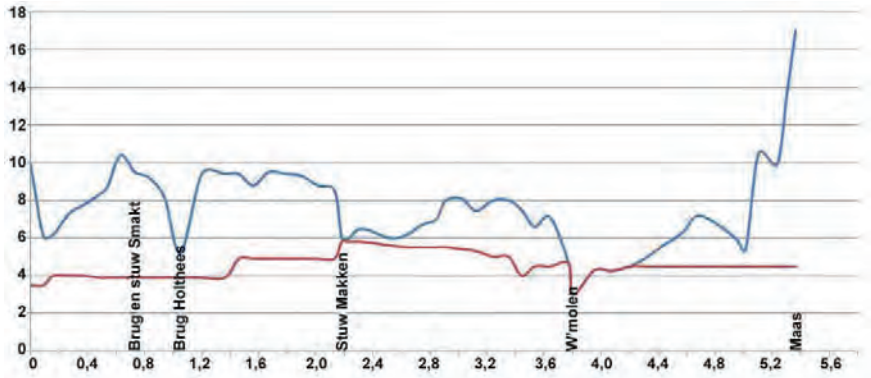
---

breedte en diepte in de lengterichting van de waterloop (zie bijvoorbeeld [figuur 5.8](#)) of een xyz-grafiek (zie bijvoorbeeld [figuur 5.9](#)). Ook de verandering van het oppervlakte van het dwarsprofiel in de lengterichting kan veel inzicht geven, zie bijvoorbeeld [figuur 5.10](#).

- De *overstromingsfrequentie*. Breng voor de trajecten met een overstromingsvlakte in beeld of er gebieden zijn die jaarlijks of tweejaarlijks overstromen. Gebruik hiervoor de informatie van de geomorfologische kaart (overstromingsvlakte), veldmedewerkers in combinatie met de hoogtekkaart ([figuur 4.1](#)) en eventueel inundatieberekeningen in het kader van de NBW-toetsingen. De afwezigheid van gebieden in de overstromingsvlakte die jaarlijks of tweejaarlijks overstromen is een indicatie voor overdimensionering.
- De *vorm van het dwarsprofiel* is vaak ook een goede indicatie voor veranderingen in de breedte en diepte (meestal een toename). Bekijk het dwarsprofiel en de waterloop. Is er sprake van een natuurlijk dwarsprofiel (met variatie in de steilheid van het talud en het onderwaterprofiel) of van een vergroot normprofiel (met gelijkvormige oevers en waterbodem)?
- De *berekende breedte en diepte* als referentie. Bepaal de gemiddelde breedte en diepte van de waterloop volgens formule (3) en (5) van het handboek geomorfologisch beekherstel, zie ook de toelichting in § 7.4. Vergelijk de huidige breedte en diepte met het berekende dwarsprofiel en stel vast of de gemiddelde breedte en diepte afwijken van de breedte en diepte in de referentiesituatie. Een afwijking van de gemiddelde breedte of diepte met meer dan een factor 1,5-2 is een indicatie voor overdimensionering.
- In de praktijk zijn er vaak natuurlijke *lokale omstandigheden* die van invloed zijn op het dwarsprofiel, zoals onregelmatigheden in de ondergrond (aanwezigheid van veen of leem), kwel in de oeverzone of de begroeiing. Beschouw de lokale situatie en beoordeel in hoeverre deze van invloed is (geweest) op het dwarsprofiel en of deze de huidige situatie kan verklaren.

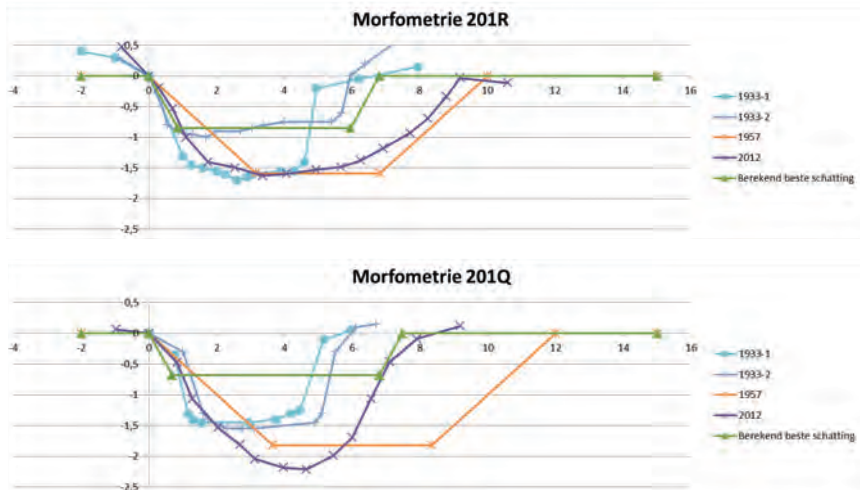
**FIG 5.8 VERLOOP VAN DE BEDDINGBREEDTE VAN DE VIERLINGSBEEKSE MOLENBEEK**

Beddingbreedte (bovenzijde van het profiel; y-as in meters) in de lengterichting (x-as in km) in 1930 (rood) en 2010 (blauw) (Kurstjens et al., 2012).



**FIG 5.9 EVALUATIE VAN HET DWARSPROFIEL OP TWEE LOCATIES IN HET DAL VAN DE AA (ASTEN-SOMEREN)**

Met twee historische profielen uit 1933 (blauw), het profiel na normalisatie in 1957 (oranje), het profiel in 2012 (paars) en het profiel op basis van formules uit het handboek geomorfologisch beekherstel (groen).



**FIG 5.10 VERLOOP VAN HET DWARSPROFIEL VAN DE VIERLINGSBEEKSE MOLENBEEK**

Verloop van het oppervlakte van het dwarsprofiel (breedte x diepte; y-as in vierkante meters) in de lengterichting van de Vierlingsbeekse Molenbeek (x-as in km) in 1930 (rood) en 2010 (groen) (Kurstjens et al., 2012).

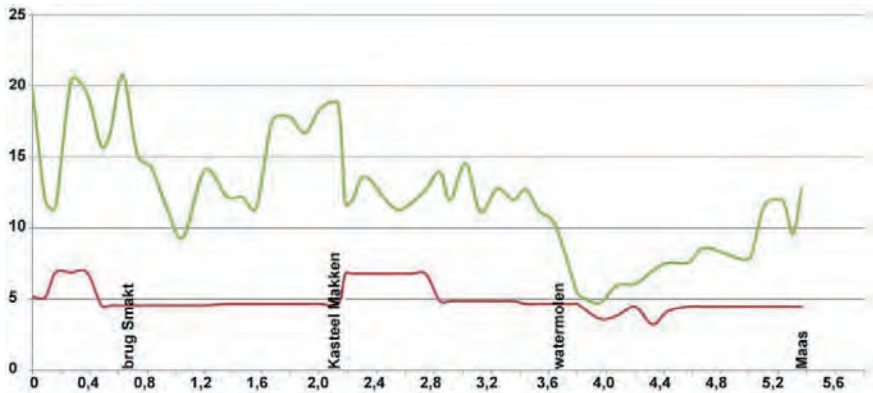
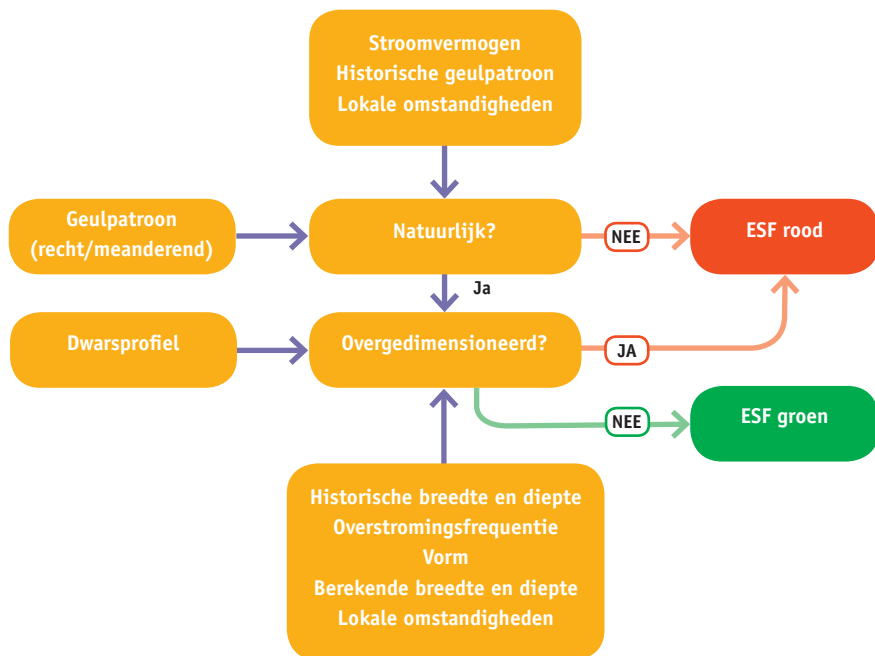




FIG 5.11 BESLISSHEMA VOOR DE ESF NATTE DOORSNEDE



### Beoordeling ESF

Beoordeel aan de hand van het beslisschema in [figuur 5.11](#) of de ESF natte doorsnede in orde is (ESF groen) of niet (ESF rood). Gebruik hiervoor de analyse en grenswaarden zoals hierboven toegelicht.

---

## H6 NADERE ANALYSE



---

In de nadere analyse wordt verder ingezoomd op het hydrologisch en morfologisch functioneren van het watersysteem. De nadere analyse van de hydrologie wordt meestal uitgevoerd op het schaalniveau van het stroomgebied; de nadere analyse van de morfologie op het niveau van het traject. De nadere analyse wordt uitgevoerd met het oog op het formuleren van de juiste maatregelen en/of het evalueren van een ontwerp. De nadere analyse voor hydrologie en morfologie bestaat uit de volgende elementen:

- Analyse van de afvoerdynamiek;
- Analyse van de morfodynamiek.

De nadere analyse wordt zoveel mogelijk gebaseerd op kwantitatieve informatie, dat wil zeggen op meetgegevens. In [bijlage B](#) is een overzicht opgenomen van de benodigde gegevens (kaartinformatie, meetgegevens en overige informatie). Voor de volledigheid zijn in dit overzicht ook de benodigde gegevens voor de overige ESF's weergegeven (in rood).

## 6.1 ANALYSE VAN DE AFVOERDYNAMIEK

Er zijn zeer veel manieren om de afvoerdynamiek te analyseren en te beschrijven. In principe zijn het vooral veel verschillende statistische methoden die kunnen worden toegepast en zijn er verschillende manieren voor de presentatie. De keuze daarvan hangt sterk samen met het doel waarmee dat gebeurt.

In internationale literatuur zijn veel methoden beschreven om voor uiteenlopende doelen rivieren te classificeren en met elkaar te vergelijken, maar er zijn maar weinig methoden om het gedrag van diverse delen van een rivier te onderzoeken en te kwantificeren. Juist dit laatste is ecologisch relevant, omdat dan de nadruk meer ligt op de verschillen tussen diverse trajecten, variatie in de tijd en hun betekenis voor de ecologische processen (Vannote *et al.*, 1980; Higler, 2002).

De stappen van de methodologie zijn opgedeeld in drie grote groepen: data, hydrologie (neerslag-afstroming) en de hydraulica van de rivier (Wolfs en Willems, 2018a). Voor het begrijpen van het systeemgedrag is het cruciaal om de hydrologische en hydraulische componenten apart te beschouwen en dus te kalibreren (Wolfs en Willems, 2018b). De duidelijke opsplitsing tussen hydrologie en rivier wordt in de praktijk slechts zelden uitgevoerd. Hoewel beide systemen uiteraard gekoppeld zijn (in realiteit zelfs bi-directioneel), zijn de processen sterk verschil-

---

lend. Wanneer het hydrologisch en het riviermodel tegelijk geconfigureerd worden en er afwijkingen optreden ten opzichte van meetreeksen, is het zeer moeilijk om de oorzaak van de afwijking precies te kunnen identificeren. Een stapsgewijze opbouw met onderscheid tussen hydrologie en hydraulica geeft de gebruiker bijkomende inzichten in de onderliggende processen, en laat een meer wetenschappelijk gefundeerde opbouw van de modellen toe (Wolfs en Willems, 2018a).

#### **Data: verzamelen en controleren van de gegevens**

In § 5.1 is het proces van verzamelen, controleren en corrigeren van de meetgegevens (zoals gemeten waterpeilen, debieten, stuwstanden, pompwerking, neerslag, etc.) uitgebreid toegelicht. Het is belangrijk dat deze stap zorgvuldig wordt uitgevoerd. Voor een nadere toelichting en meer voorbeelden zie Wolfs en Willems (2018a en b).

Aanbevolen wordt om de verschillende methoden te combineren om een goed beeld te krijgen van de afvoerdynamiek. Een tijdreeksanalyse in combinatie met een frequentieverdeling geeft bijvoorbeeld zowel inzicht in de variatie, het moment van voorkomen van hoge en lage afvoeren als met de relatie met de neerslag en verdamping. Daarnaast biedt het inzicht in de frequentie en duur van debietklassen, waarmee per debietklasse kan worden beschouwd welke bijdrage de debietklasse levert aan de afvoer en (later) het sedimenttransport. Tenslotte kunnen hieruit meetfouten en trends worden gesignaleerd en geeft het meer inzicht in de achterliggende processen.

#### **Data: correctie van de afvoergegevens voor hydraulische kunstwerken en overstromingsgebieden**

De volgende stap in de analyse is het omzetten van een gemeten debietreeks in een tijdreeks van 'natuurlijke afstroming' van een stroomgebied. Dit is het debiet op het moment dat het de rivier binnenkomt. Aan deze reeks moet het hydrologisch model gekalibreerd worden (Wolfs en Willems, 2018a).

In het algemeen zijn er twee grote invloeden op de rivierdynamica, en dus op de conversie van een debietmeetreeks in de rivier naar een tijdreeks van natuurlijke afstroming (Wolfs en Willems, 2018a): hydraulische kunstwerken (en gelijkaardig, afwaartse randvoorwaarden) en overstromingsgebieden.

---

Stuwen (zeker die beweegbaar zijn) kunnen een zeer grote invloed hebben op de rivierdynamiek. Plotse bewegingen leiden tot (onnatuurlijke) debietsprongen. Dit is ook zo voor pompen en bepaalde invloedrijke benedenstroomse randvoorwaarden. Dergelijke effecten moeten geneutraliseerd worden om te komen tot de natuurlijke afstroming van een stroomgebied.

Overstromingsgebieden kunnen eveneens een grote invloed hebben op de berekening van het natuurlijk afstromingsdebiet. Immers, tijdens perioden van overstromingen zal een deel van het water afgeleid worden naar de overstromingsgebieden, en als gevolg hiervan niet passeren langs de meetlocatie van het debiet in de rivier zelf.

Wolfs en Willems (2018) beschrijven enkele bewerkingen om de gemeten debietreeksen om te zetten in een tijdreeks van natuurlijke afstroming. De belangrijkste bewerkingen hebben betrekking op het inrekenen van het effect van hydraulische kunstwerken:

- In een eerste stap wordt het debiet over de stuw of pomp bepaald via een stuwformule (of op basis van de pompkarakteristieken). Hiertoe zijn op- en afwaartse waterhoogten nodig, net als de geometrie van de stuw (breedte, type, etc.). Als de stuw beweegbaar is, moet eveneens de kleppositie op ieder ogenblik nauwkeurig gekend zijn. De gebruiker kiest een gepaste stuwformule. Belangrijk is dat verdronken (volkomen) stroming ook goed wordt weergegeven door de formule. Indien hiermee geen rekening gehouden wordt, zullen piekdebieten sterk overschat kunnen worden.
- In een tweede stap wordt de waterbalans expliciet gesloten. Dit betekent dat alle in- en uitgaande debieten (behalve de gezochte natuurlijke afstroming uiteraard) berekend moeten worden. Deze stap is van belang indien er significante andere in- of uitstromen zijn, zoals vertakkingen, riooloverstorten of andere lozingen en onttrekkingen. Daarnaast is deze stap ook van belang indien er een significant volume in de rivier geborgen wordt. Stel bijvoorbeeld dat de stuw voor een langere periode gesloten wordt, dan zal de opwaartse waterhoogte (en dus het geborgen volume) toenemen door natuurlijke afstroming. Het debiet over de stuw zal echter 0 bedragen.

Voor de overige bewerkingen zie Wolfs en Willems (2018).

---

### Hydrologie (neerslag-afstroming)

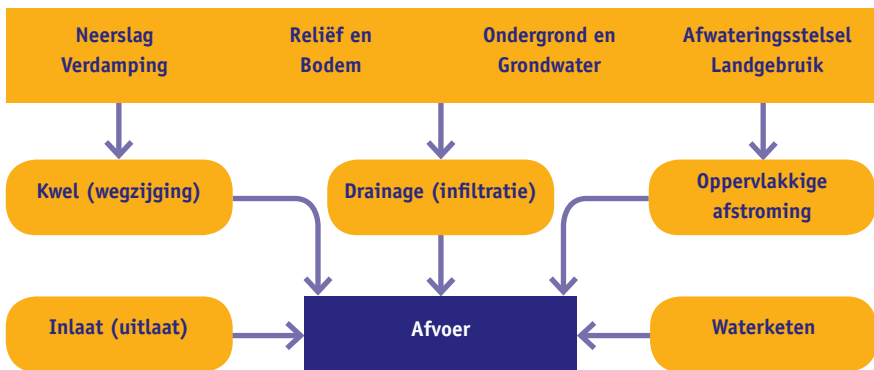
Nadat de natuurlijke afstroming gekend is, kan deze tijdreeks nader geanalyseerd worden. Een hydrologische analyse heeft als doel om meer inzicht te verkrijgen in de afvoerdynamiek van een stroomgebied en vormt zo de basis voor de verdere hydrologische modellering (Wolfs en Willems, 2018b).

#### *Systeemkarakteristieken*

De afvoer en het afvoerpatroon worden bepaald door de neerslag, verdamping en diverse systeemkenmerken, zoals de opbouw van de bodem, de omvang van het stroomgebied en de stroming van het grondwater, zie figuur 6.1 (herhaling van figuur 2.4). Deze factoren vormen de basis voor de hydrologische modellering en worden (op verschillende manieren) gebruikt als invoer voor het model. Voor een goed begrip van het functioneren van het watersysteem en ter ondersteuning van de modellering en de interpretatie van de resultaten worden deze factoren eerst afzonderlijk bestudeerd.

---

**FIG 6.1** AFVOER, AFVOERCOMPONENTEN EN SYSTEEMKENMERKEN DIE DE AFVOER BEPALEN



- 
- Neerslag, verdamping en overige bronnen van oppervlaktewater (RWZI's, inlaatwater, etc.), zie § 5.1.
  - Reliëf en bodem: oppervlakkige afstroming heeft vooral te maken met het reliëf en de infiltratie- en/of bergingscapaciteit van de bovengrond. Ook bodemverdichting door zware landbouwmachines speelt hierbij een rol (zie • landgebruik).

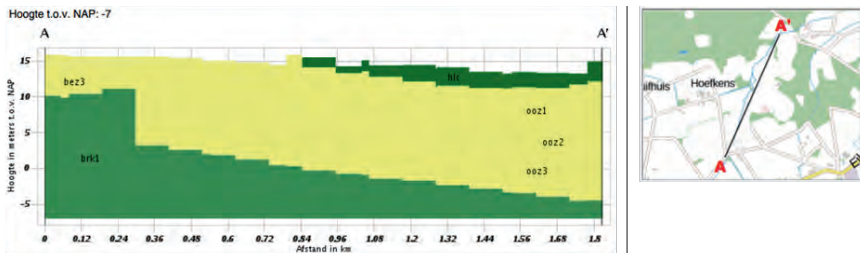
- *Reliëf*: bekijk de hoogtekaart uit de quickscan (zie § 4.1). Waar is sprake van grote hoogteverschillen en waar niet?
- *Bodem*: bekijk de bodemkaart uit de quickscan (zie § 4.1). Welke bodemtypes komen voor in het beektraject en wat zijn de relevante kenmerken van deze bodemtypes? Maak hiervoor gebruik van de achtergrondinformatie in § 7.1.
- *Ondergrond en grondwater*: combineer de informatie over de ondergrond met de kwelkaart om een eerste indruk te krijgen van de aard en stromingsrichting van het grondwater:
- *Ondergrond*: maak een doorsnede van de (diepere) ondergrond ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl), ondergrondmodellen, REGIS II) en geef het resultaat weer in een figuur (zie figuur 6.2). Hoe homogeen of heterogeen is deze opbouw? Zijn er slecht doorlatende lagen in de ondergrond (bijvoorbeeld keileem- en kleilagen en veenpakketten)? En hebben deze lagen een gesloten of onderbroken verspreiding in het gebied? Zie ook § 5.4 in Besselink *et al.* (2017).
- *Grondwater*: bekijk de verzamelde kwelkaarten en schat de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater op stroomgebiedsniveau (kwel of infiltratie). De kwelkaarten zijn vaak gebaseerd op (regionale) grondwatermodellen en niet heel nauwkeurig, zie ook § 5.6 in Besselink *et al.* (2017).
- Verzamel ook informatie over grootschalige onttrekkingen (drinkwater, industriewater). Bepaal indien mogelijk de omvang van deze onttrekkingen.
- *Afwateringsstelsel*: bekijk de vorm en dichtheid van het afwateringsstelsel (zie kaart § 4.1). Een 'rond stroomgebied' geeft een ander afvoerpatroon dan een stroomgebied met een langgerekte vorm. En waar is er sprake van een hoge dichtheid en waar van een lage dichtheid sloten, greppels en dergelijke?
- *Landgebruik*: bepaal het percentage landgebruik bebouwing, infrastructuur, grasland, bouwland (akker), kassen, bos, heide/ stuifzand en water. Gebruik hiervoor de LGN-kaart (Landgebruik Nederland), zie ook § 4.1. Bepaal het percentage grasland en bouwland en het percentage verhard oppervlak (bebouwing, infrastructuur en kassen) in het stroomgebied. Zie ook § 5.12 in Besselink *et al.* (2017).
- *Aanwezigheid gedraineerde percelen (optioneel)*: bepaal de ligging en het percentage areaal met drainage. Gebruik hiervoor de beschikbare informatie bij het waterschap (kaartlaag in GIS of informatie van veldmedewerkers).
- *Historisch landgebruik en afwateringsstelsel (optioneel)*: bekijk het historische landgebruik en het historische afwateringsstelsel, bijvoorbeeld via [www.topotijdreis.nl](http://www.topotijdreis.nl). Zoom in op de kaart en scroll in de tijdbalk om te zien hoe het gebied in



de afgelopen 200 jaar is veranderd. Hoe zijn het landgebruik en het afwatersstelsel veranderd? Zie ook § 5.13 in Besselink *et al.* (2017).

### FIG 6.2 DOORSNEDEN VAN HET STROOMGEBIED VAN DE HOOGHE RAAM

In de lengterichting met een hellend zandpakket (geel) op klei (lichtergroen).



#### Hydrologische analyse

Bij het uitvoeren van een hydrologische analyse wordt de bijdrage van de verschillende aan- en afvoerposten bepaald. Belangrijk zijn neerslag en verdamping, oppervlakkige toestroom van ondiep grondwater, aanvoer van diep grondwater, wegzijging en de inlaat en afluut van oppervlaktewater.

Een hydrologisch model heeft als doel om de neerslag-afstroming te kunnen simuleren (voor gegeven neerslagreeksen). Tijdens het kalibratieproces worden inzichten verworven over de dynamica van het stroomgebied, zoals bijvoorbeeld de fracties van de verschillende deelstromen, de snelheid van afstroming en informatie over de afstromingsfracties van de drie deelstromen in functie van de verzadigingsgraad (Wolfs en Willems, 2018b). Hierbij gaat het om de oppervlakkige afstroming ('overland flow'), afvoer vanuit de onverzadigde zone ('interflow') en afvoer vanuit het grondwater (verzadigde zone) ('baseflow').

Aangeraden wordt om hydrologische processen te modelleren op basis van conceptuele modellen (Wolfs en Willems, 2018a). Voorbeelden van conceptuele hydrologische modellen zijn de rekentool waterbalansen (STOWA, 2015-17), VHM (Willems, 2014) en WALRUS (Brauer *et al.*, 2014). Deze methoden worden verder

---

toegelicht in [bijlage C](#). Binnen Sobek is een neerslag-afvoermodule beschikbaar voor het beschrijven van de relatie tussen neerslag en afstroming (SOBEK-RR, Deltas).

### **Hydraulica van de rivier**

Een gekalibreerd hydrologisch model simuleert hoeveel water het oppervlaktewaterstelsel bereikt. Dit vormt de input voor riviermodellen, zoals bijvoorbeeld Sobek. Dergelijke hydraulische modellen zijn geschikt voor het verklaren en voorspellen van het waterpeil en de (gemiddelde) stroomsnelheid ([zie ook § 4.3](#)). Daarnaast zijn dergelijke modellen nodig voor de evaluatie van het sedimenttransport en tendensen in erosie en sedimentatie, [zie § 6.2](#).

Een hydrologisch model is in principe compatibel met elk riviermodel, desnoods door het opleggen van de neerslagafstroming als randvoorwaarde (debietreeks) aan het model indien het model omwille van technische redenen niet rechtstreeks gekoppeld kan worden.

Als alternatief kunnen andere neerslag-afstromingsmodellen ook gekalibreerd worden aan de geïdentificeerde deelstromen, of is zelfs een directe vertaling mogelijk van de parameters van het gebruikte hydrologisch model naar andere modellen. De meeste conceptuele hydrologische modellen gebruiken immers gelijkaardige modelvergelijkingen (Wolfs en Willems, 2018b).

### **Gedistribueerd hydrologisch en hydraulisch model**

Een ander alternatief is de toepassing van een geïntegreerd gedistribueerd hydrologisch en hydraulisch model (Sobek CFRR). Een dergelijk model is opgesteld en gekalibreerd voor de casestudie Hooge Raam. Daaruit is gebleken dat met behulp van GIS-data en resultaten uit een grondwatermodel vrij snel een model kan worden gemaakt dat in staat is het systeemgedrag betrouwbaar te simuleren. De kalibratie vergt wel de nodige tijd, maar dat hangt vooral samen met de beperkte data uit het grondwatermodel en de beperkte nauwkeurigheid van de verdamping in neerslagdata (onder andere MeteoBase). Beide zullen in de nabije toekomst verbeterd worden.

---

## 6.2 ANALYSE VAN DE MORFODYNAMIEK

Er zijn diverse disciplines betrokken bij onderzoek naar de morfologie van beken en rivieren en elke discipline heeft een specifieke focus op morfodynamiek. Daarbij valt op dat er vooral veel aandacht is voor de grootschalige zichtbare veranderingen van de vormen en structuren, zoals bochten en oevers, maar dat er nog beperkt aandacht is voor de morfodynamiek op de schaal van habitats en levensgemeenschappen. De kleinschalige veranderingen in de bodem en de samenstelling van het beddingmateriaal zijn juist maatgevend voor de ecologische kwaliteit van stromende wateren (Tolkamp, 1980; Verdonschot, 1995; Higler, 2002).

Het sedimenttransport en het bodemsubstraat zijn zeer dynamisch als gevolg van veranderingen in de stroomsnelheid, het waterpeil (afvoer, plantengroei) en de aanvoer van beddingmateriaal. Om het sedimenttransport te kunnen evalueren, is het noodzakelijk om gebruik te maken van hydraulische modellen. Met behulp van deze modellen kan het sedimenttransport vrij goed ingeschat worden. Hiermee kan inzicht worden verschaft in de ‘tendensen voor erosie en sedimentatie’ en de kans dat een bepaald bodemsubstraat zal ontstaan (op hoofdlijnen).

De sedimenttransportcapaciteit kan net zoals de stroomsnelheid in principe dynamisch worden berekend met sedimenttransportformules, maar dan zijn de resultaten nog niet eenvoudig te interpreteren omdat het nog geen inzicht geeft in de concrete erosie en sedimentatie. Of ergens erosie en sedimentatie op zal treden, hangt namelijk mede af van de hoeveelheid en de eigenschappen van het sediment dat bovenstreams wordt aangevoerd en van de duur. Daarvoor zijn gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit het meest bepalend.

### **Methode op hoofdlijnen**

Om te beginnen wordt de afvoer in een bepaalde afvoerperiode onderverdeeld in debietklassen en wordt stationair per debietklasse het sedimenttransporterend vermogen berekend. Door vermenigvuldiging van het sedimenttransporterende vermogen met de duur (en frequentie) kan vervolgens het totale sedimenttransport per debietklasse worden berekend en het aandeel van elke debietklasse in de totale (jaarlijkse) sedimenttransportcapaciteit. De morfodynamiek kan worden bepaald uit de variatie in het sedimenttransporterend vermogen in de tijd in een traject, of uit de verschillen van elkaar opvolgende trajecten (of segmenten) in een bepaalde periode.

---

In principe treedt bij elke debietklasse een andere bodemligging op en kan het verschil in de berekende bodemligging gebruikt worden als maat voor de dynamiek. Dit kan mogelijk worden gebruikt om bij benadering te schatten hoe groot de dynamiek van de bodem is, welke laagdikte het betreft, etc. Hierbij wordt wel opgemerkt dat in veel gevallen de duur van de afvoer(golf) te kort is om de berekende bodemligging (evenwicht) ook daadwerkelijk te realiseren. Hierdoor wordt de berekende evenwichtssituatie nooit echt bereikt.

Het is nog niet precies duidelijk welke nauwkeurigheden kunnen worden bereikt en welke mate van voorspellende waarde dergelijke berekeningen van het sedimenttransporterend vermogen met Sobek2 (1D) hebben. De gedachte is dat met deze methode in ieder geval onderscheid kan worden gemaakt tussen diverse ontwerpvarianten. De grootste onzekerheid betreft waarschijnlijk de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment dat wordt aangevoerd uit het bovenstrooms gelegen stroomgebied. In § 7.7 worden enkele bestaande methoden genoemd om daar schattingen van te kunnen maken.

### **Tendensen voor erosie- en sedimentatie**

Uitgangspunt voor de analyse van de morfodynamiek is de beschikbaarheid van een jaarrondberekening, waarmee gedurende een jaar waterdiepten en stroomsnelheden beschikbaar zijn. Dit is eigenlijk alleen efficiënt te doen met behulp van een goed gekalibreerd hydraulisch model. Dit geldt zeker voor de procedure van de berekening van de sedimenttransportcapaciteit.

Er zijn diverse modellen beschikbaar waarmee de morfodynamiek beschreven kan worden. In de nadere analyse wordt gebruik gemaakt van de sedimenttransportformules die beschikbaar zijn in het waterbewegingsmodel Sobek2 (Frijlink voor het bodemtransport, van Rijn voor het totale transport). De resultaten van deze formules zijn goed genoeg om langs de lengtegradiënt van een waterloop te kunnen evalueren (voorspellen) waar sprake is van erosie en waar van sedimentatie (kwalitatief oordeel).

De nadere analyse van de morfodynamiek bestaat uit de volgende stappen:

- Selecteer het deelgebied waarvoor de morfodynamiek dient te worden onderzocht, maak eventueel een kleiner deelmodel (van het stroomgebiedsmodel).

- Bepaal de afvoeren gedurende een jaar (met behulp van de jaarrondberekening) bovenstrooms van het deelgebied, dit wordt de bovenstroomse randvoorwaarde voor het deelmodel.
- Bepaal de waterpeilen gedurende een jaar (met behulp van de jaarrondberekening) benedenstrooms het deelgebied, dit wordt de benedenstroomse randvoorwaarde voor het deelmodel.
- Reken het model jaarrond door met de geselecteerde/geactiveerde sedimenttransportformules in Sobek2.

Dit levert de uitvoer (tijdreeksen gedurende een jaar) van waterpeilen, waterdiepten, debieten, (diepte)gemiddelde stroomsnelheden en de sedimenttransportcapaciteit volgens de formules van Frijlink en Van Rijn voor de geselecteerde trajecten.

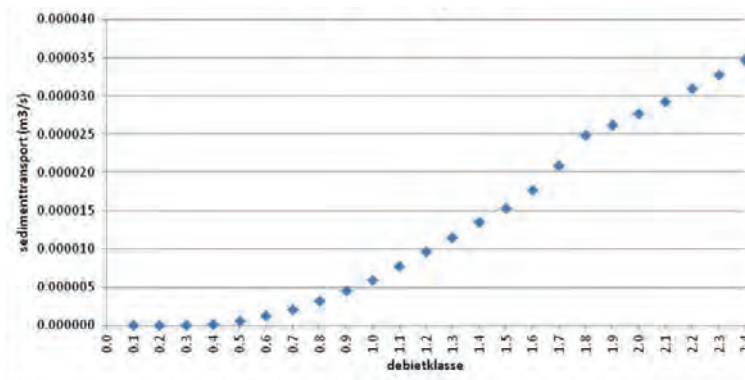
Vervolgens wordt berekend welke debietklassen bijdragen aan het sedimenttransport en welke debietklasse de grootste bijdrage heeft in het totale sedimenttransport. Hiertoe wordt de debiet-meetreeks eerst omgezet in debietklassen:

- Maak een histogram van de afvoermetingen met behulp van zelf gekozen debietklassen (bijvoorbeeld met een stapgrootte van 100 l/s), als dit niet reeds is gedaan ten behoeve van de afvoerdynamiek, zie [figuur 5.4](#). Maak hierbij een aparte debietklasse voor de afvoer = 0.
- Bereken voor elke debietklasse de sedimenttransportcapaciteit met Sobek2 (dit kan in batch modus). De sedimenttransportcapaciteit is de hoeveelheid sediment die per seconde getransporteerd wordt ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- Maak een grafiek met de sedimenttransportcapaciteit per debietklasse, zie bijvoorbeeld [figuur 6.3](#). Hieruit is af te lezen hoe de sedimenttransportcapaciteit toeneemt met het debiet.
- In het voorbeeld van [figuur 6.3](#) is te zien dat de sedimenttransportcapaciteit minder toeneemt vanaf debietklasse 1.8  $\text{m}^3/\text{s}$ . Op dat moment treedt er inundatie van de eerste bermen (van het accoladeprofiel) op. Dit leidt tot een toename van de breedte en van de ruwheid. Bovendien is er bij hoge afvoeren benedenstrooms sprake van opstuwing. Hierdoor nemen de gemiddelde stroomsnelheid en de sedimenttransportcapaciteit minder toe.
- Bepaal vervolgens het cumulatieve sedimenttransport per debietklasse, zie bijvoorbeeld [figuur 6.4](#). Hieruit is af te leiden waar de grootste overgangen in de sedimenttransportcapaciteit zijn.

- Uit **figuur 6.4** is af te leiden dat er veranderingen optreden bij de debietklasse van 0.9 m<sup>3</sup>/s en bij 1.9 m<sup>3</sup>/s. Dit is het gevolg van de profielvorm (hydraulische straal) en andere hydraulische effecten, zoals opstuwung en verandering van de ruwheid.

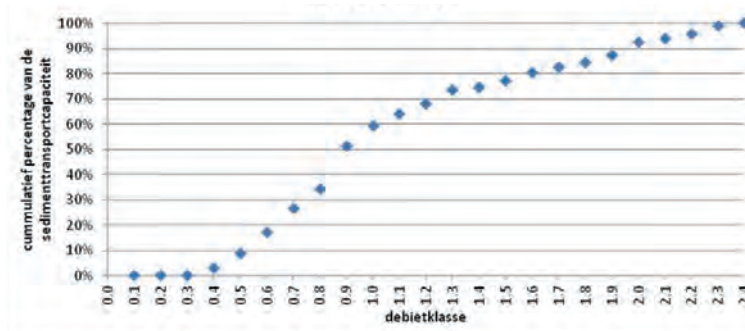
**FIG 6.3 SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT IN M<sup>3</sup>/S PER DEBIETKLASSE (FORMULE VAN RIJN) (HOOG RAAM)**

Voor een toelichting zie de tekst hierboven.



**FIG 6.4 CUMULATIEVE SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT IN PERCENTAGE PER DEBIETKLASSE (FORMULE VAN RIJN) (HOOG RAAM)**

Voor een toelichting zie de tekst hierboven.



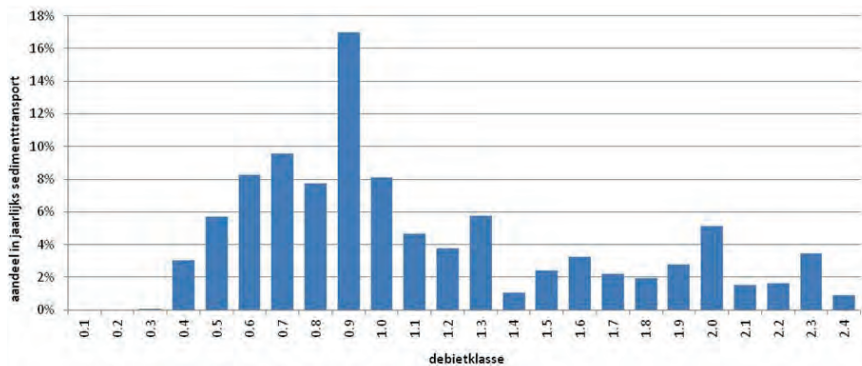


- Maak ten slotte een histogram van de sedimenttransportcapaciteit per debietklasse, zie figuur 6.5. Hieruit is af te leiden welke debietklassen het grootste aandeel hebben in het sedimenttransport.

Uit figuur 6.5 kan worden afgeleid dat de eerste drie debietklassen nagenoeg geen sedimenttransport tot gevolg hebben. Verder blijkt dat de lagere afvoeren die veel frequenter optreden een groter aandeel hebben in het sedimenttransport dan de minder frequente hogere afvoeren. Dat grote afvoeren een minder grote invloed hebben op het totale sedimenttransport komt (in dit geval) door de inundatie die dan optreedt en de minder grote stroomsnelheden en schuifspanningen in de bedding.

**FIG 6.5 HISTOGRAM VAN HET SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT IN PERCENTAGE VAN HET TOTAAL PER DEBIETKLASSE (HOOGTE RAAM) (AANDEEL PER DEBIETKLASSE)**

*Voor een toelichting zie de tekst hierboven.*



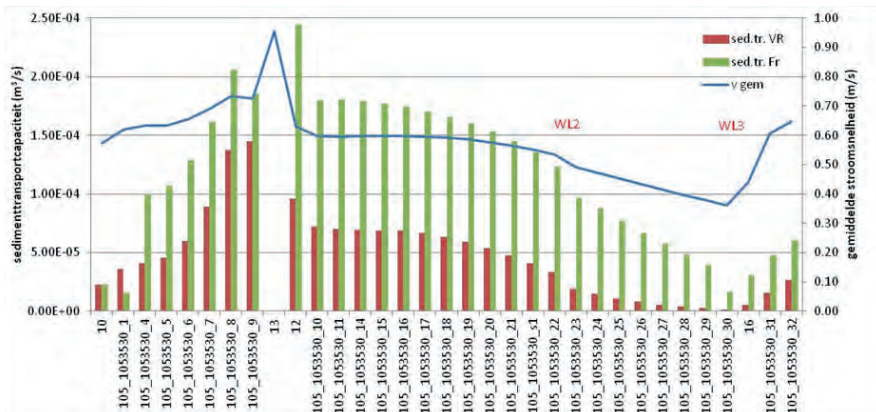
De bepaling van de mate van dynamiek kan nu globaal worden bepaald door de verschillen tussen de sedimenttransportcapaciteiten van de diverse debietklassen (perioden met een bepaald debiet) te beschouwen. Bijvoorbeeld het verschil tussen de hoogfrequente lagere debietklassen die een groot aandeel hebben in het totale jaarlijkse sedimenttransport en de laagfrequente debietklassen met een zeer grote sedimenttransportcapaciteit.

Door de verschillen in het sedimenttransportcapaciteit in een lengteprofiel te bepalen (bij de dominante afvoer en de lage en hoge afvoer) kan vervolgens worden bepaald waar erosie en sedimentatie kunnen optreden.

- Plot de sedimenttransportcapaciteit samen met de stroomsnelheid uit langs de lengterichting van de waterloop, zie bijvoorbeeld **figuur 6.6**. Gebruik hiervoor de meest relevante debietklassen, (meestal) de meest voorkomende debietklasse (af te lezen uit de afvoer-frequentieverdeling, zie **figuur 5.4**) en de debietklasse met de hoogste sedimenttransportcapaciteit,
- Kijk naar de *veranderingen in de sedimenttransport-capaciteit langs de lengterichting van de waterloop*:
  - De sedimenttransport-capaciteit neemt (snel) toe: er kan (sterke) netto erosie optreden.
  - De sedimenttransport-capaciteit neemt (snel) af: er kan (sterke) netto sedimentatie optreden.

Uit **figuur 6.6** blijkt dat de stroomsnelheid en de sedimenttransportcapaciteit afnemen in stroomafwaartse richting. Verder valt op dat de sedimenttransportcapaciteiten van Frijlink en van Van Rijn afwijken: het berekende sedimenttransport met de formule van Frijlink (bodemtransport) is groter dan het resultaat met de formule van Van Rijn (totale transport). Dit is vreemd omdat het bodemtransport nooit groter kan zijn dan het totale transport en bevestigt de stelling dat de formules alleen kwalitatief gebruikt mogen worden.

**FIG 6.6 BEREKENDE STROOMSNELHEID EN SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT IN HET ONDERZOEKSTRAJECT IN DE HOOG E RAAM (BIJ DEBIETKLASSE 2,4 M<sup>3</sup>/S)**



---

Met de berekening van de sedimenttransportcapaciteit kan inzicht worden verkregen in de gradiënten van het sedimenttransport en daarmee kan indicatief worden bepaald waar erosie en sedimentatie zijn te verwachten. Of dat ook daadwerkelijk gebeurt, hangt af de hoeveelheid sediment die wordt aangevoerd uit het bovenstrooms gelegen stroomgebied. In § 7.7 worden enkele methoden genoemd om daar een schatting van te kunnen maken. Als de sedimenttransportcapaciteit groter is dan de hoeveelheid sediment die wordt aangevoerd, dan zal erosie optreden en als er meer sediment wordt aangevoerd dan er getransporteerd kan worden, dan zal sedimentatie optreden. Als het sedimenttransport in evenwicht is met de sedimenttransportcapaciteit, dan zullen de beddingdimensies niet veel veranderen. Men spreekt dan ook wel van de evenwichtsdimensies. Dit wil overigens niet zeggen dat er gedurende het jaar geen schommelingen optreden, maar de dimensies zullen rondom het gemiddelde blijven.

- Schat de sedimenttransportcapaciteit (of de hoeveelheid aangevoerd sediment) in het meest bovenstrooms gelegen segment (randvoorwaarde).
- Bepaal waar sedimentatie en erosie kunnen optreden.
- Schat met behulp van (het verloop van) de sedimenttransportcapaciteit, de stroomsnelheid, de samenstelling van de ondergrond (zie de bodemkaart) en de aard en hoeveelheid van het aangevoerde sediment welke type sediment waar verwacht kan worden.

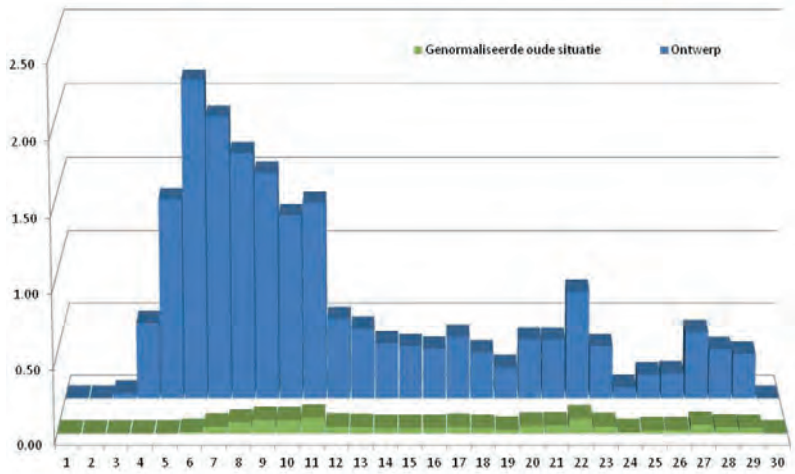
Uit alle bovenstaande aspecten tezamen kan worden bepaald hoe dynamisch de beddingbodem en de habitats zijn. Dit is echter moeilijk of niet uit te drukken in een specifieke waarde van een bepaalde parameter. Daarom is hiervoor nog geen grenswaarde te geven.

### **Voorbeeld toepassing**

De berekening van het verloop van de sedimenttransportcapaciteit per debietklasse kan ook goed worden gebruikt om mee te ontwerpen, om verschillende ontwerpen met elkaar te vergelijken of om de effecten van maatregelen te bepalen. Ter illustratie is in [figuur 6.7](#) de sedimenttransportcapaciteit voor de genormaliseerde situatie en een ontwerp van de Lunterse Beek weergegeven. Voor de analyse zijn de debietmetingen (kwartierwaarden) ingedeeld in 30 debietklassen (met een interval van 200 l/s). Daarna is het sedimenttransporterend vermogen per debietklasse bepaald (per kwartier).

Uit de figuur blijkt dat de sedimenttransportcapaciteit van het ontwerp veel groter is dan van de voormalige genormaliseerde en gestuwde loop, vooral bij de lagere debiet(klass)en. Dit komt in dit geval vooral door de combinatie van het opheffen van de stuw en het aangelegde accoladeprofiel. Dit betekent dat in het ontwerp meer sedimenttransport zal gaan optreden en dat er als gevolg daarvan erosie en sedimentatie zal plaats vinden. In de genormaliseerde situatie trad vrijwel alleen sedimentatie op, behalve bij het strijken van de stuw bij extreme piekafvoeren.

**FIG 6.7 VERGELIJKING VAN DE SEDIMENTTRANSPORTCAPACITEIT VAN DE GENORMALISEERDE LOOP (GROEN) EN HET ONTWERP (BLAUW) VOOR DE LUNTERSE BEEK IN M<sup>3</sup>/S PER DEBIETKLASSE (INTERVAL VAN 200 L/S) (LASEROMS, 2013)**



### Andere methoden

Tenslotte kan desgewenst voor meer precieze specifieke vragen de morfodynamiek diepgaander worden onderzocht, waarbij wordt berekend hoe de bodemligging veranderd in de tijd of in bepaalde geselecteerde perioden. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van onder andere Sobek RE (1D) of van een 2D of 3D hydromorfologisch model (Delft3D, DFlow, CCHE2D, HECRAS).

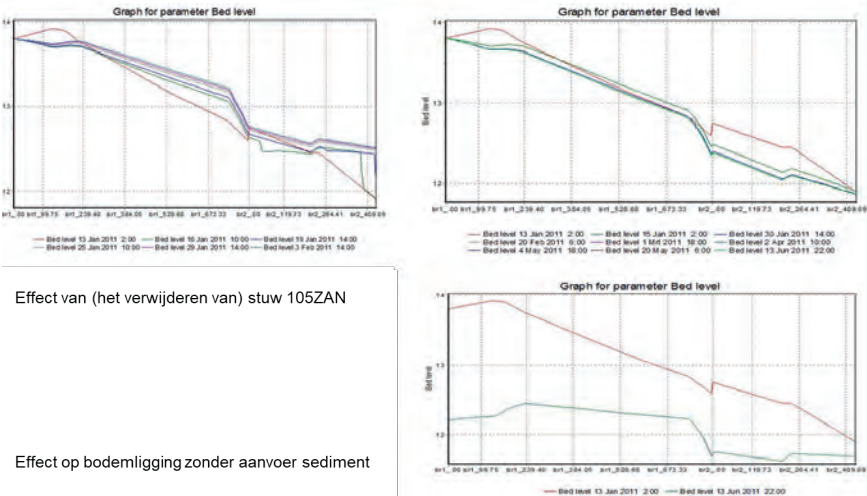
*Sobek RE*

Met Sobek RE kunnen de veranderingen in de bodemligging onder invloed van het sedimenttransport worden onderzocht en berekend. Ter illustratie is in **figuur 6.8** de berekende verandering van de bodemligging in het onderzoekstraject van Joris Eekhout in de Hooge Raam weergegeven. De lijntjes tonen de bodemhoogte in de lengterichting (x-as) van het onderzoekstraject. De rode lijn toont de Ausgangssituatie, de overige lijntjes de berekende nieuwe bodemhoogte na verloop van tijd (rood>groen>blauw).

De figuur linksboven toont sedimentatie benedenstrooms in het traject. Dit hangt samen met de aanwezigheid van een stuw (105ZAN). De figuur rechtsboven geeft weer hoe de bodem zich zou ontwikkelen zonder de opstuwing van stuw 105ZAN. De figuur rechtsonder geeft de situatie weer indien er geen aanvoer van sediment van bovenstrooms zou zijn. In dat geval zou de bodem zich door erosie sterk verlagen (groen ten opzichte van rood).

**FIG 6.8 RESULTATEN TESTBEREKENINGEN IN SOBEK RE (HOOGHE RAAM)**

Voor een toelichting zie de tekst.



Effect van (het verwijderen van) stuw 105ZAN

Effect op bodemligging zonder aanvoer sediment

---

### *Delft3D en/of CCHE2D*

Met 2D of 3D numerieke modellen zoals Delft3D en CCHE2D is de afvoer- en morfodynamiek nog gedetailleerder te bestuderen. In principe zijn voor 2D/3D-modellen niet meer gegevens nodig dan voor 1D-modellen. Evenals bij 1D-modellen is de gegevensbehoefte vooral afhankelijk van de vraag (mate van detail en gewenste nauwkeurigheden).

In [figuur 6.9](#) zijn de resultaten van een modellering van een afvoerpiek in de Lunterse beek bij Renswoude met CCHE2D weergegeven. De ruimtelijke verdeling en de animaties van stroomsnelheden en waterdiepten vormen een grote meerwaarde van dit type analyse. In de figuur is te zien dat de stroomsnelheid in de zomerbedding bij lagere afvoeren op twee plaatsen hoger is. Dit zijn de twee deeltrajecten met veen in de ondergrond. De stroomsnelheidsveranderingen bij hoge afvoeren komen overeen met waarnemingen: bij het vollopen van de winterbedding neemt de stroomsnelheid in de zomerbedding af. De locatie met de hoogste stroomsnelheden verplaatst ook (naar de versmalling).

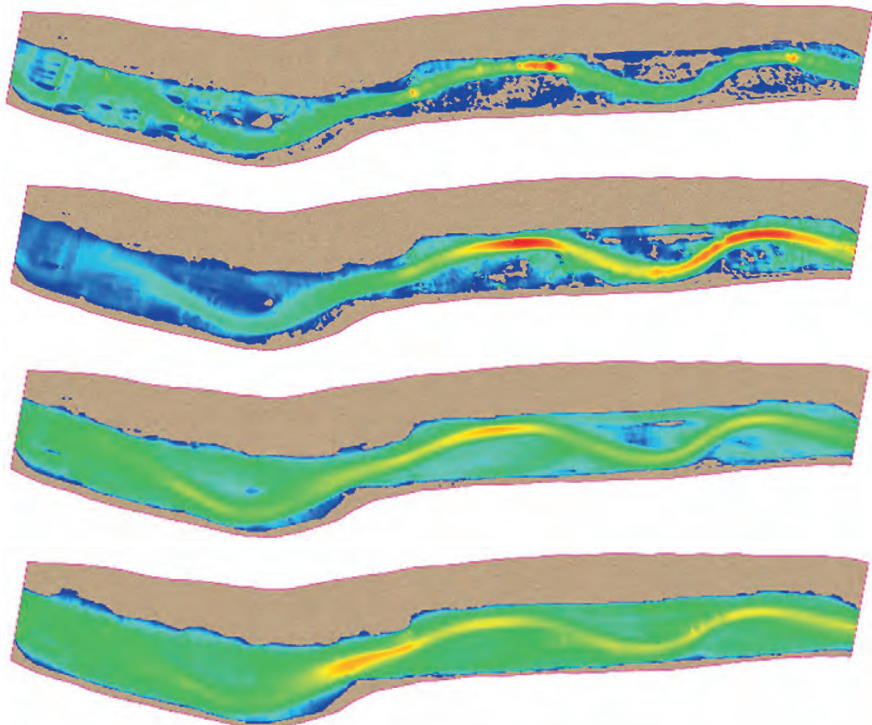
Tegelijkertijd met de hydraulica worden ook de morfologische veranderingen in de bedding berekend. In [figuur 6.10](#) zijn de berekende veranderingen van de bodemhoogte weergegeven tijdens een zeer hoge piekafvoer tussen 14 en 16 december 2011. Uit de berekende beddingveranderingen blijkt dat de diepe kuil in de meest rechtse bocht zou aanzanden. Dit is ook waargenomen bij veldverkenningen. Voor meer informatie wordt verwezen naar het hydromorfologisch onderzoek Lunterse Beek (Laseroms, 2013).



**FIG 6.9 BEREKENDE STROOMSNELHEDEN 1 T/M 3 JANUARI 2012 BIJ EEN TOENEMENDE EEN AFVOER IN DE LUNTERSE BEEK BIJ RENSWOUDE**

*Van boven naar beneden; rood=hoog; blauw=laag. Voor een toelichting zie de tekst.*

*Bron: (Laseroms, 2013).*



**FIG 6.10 BEREKENDE BEDDINGVERANDERING TUSSEN 14 EN 16 DECEMBER 2011**

De positieve getallen (rood-geel) betekenen ophoging van de bedding (sedimentatie), de negatieve getallen op verlaging (erosie).





---

# H7 ACHTERGROND





---

Dit hoofdstuk is bedoeld als achtergrond bij de methode uit hoofdstuk 4 t/m 6 en bevat hoofdzakelijk informatie die nodig is om de uitkomsten van de analyses te kunnen interpreteren. Verder wordt een toelichting gegeven op (de herkomst) van de gehanteerde vuistregels en grenswaarden (criteria).

## 7.1 SYSTEEMKENMERKEN M.B.T. DE AFVOER

### Hoogteverschillen en reliëf (zie ook § 5.5 in STOWA, 2017-05)

In figuur 4.1 is een voorbeeld opgenomen van een hoogtekartaart. Uit een hoogtekartaart kan al veel worden afgeleid over de hydrologie en morfologie van het stroomgebied. Let onder andere op de volgende aspecten:

- (Natuurlijke) omvang van het stroomgebied.
- (Natuurlijke) stromingsrichting van het oppervlaktewater.
- Doorgravingen (doorsnijdt het oppervlaktewater hogere(re) delen in het landschap?).
- Vergravingen (loopt het water op het laagste punt in het dal?).
- Plekken met meer en minder dalverhang.

### Bodemkaart (zie ook § 5.10 in STOWA, 2017-05)

Op basis van de bodemkaart kunnen de landschapsecologische positie van het beekstelsysteem (zie [www.landschapsleutel.wur.nl](http://www.landschapsleutel.wur.nl)) en enkele hydrologische en morfologische kenmerken van de bodem worden afgeleid. Ter ondersteuning van de interpretatie van de bodemkaart zijn in tabel 7.1 t/m 7.3 de relevante hydrologische (h) en geomorfologische (m) kenmerken van de voornaamste bodemtypen in beek- en rivierdalen weergegeven. Voor meer informatie zie (Ten Cate *et al.*, 1995) en [http://landschapsleutel.wur.nl/documentatie/htm/Legendas%20Bodemkaarten.htm#\\_Toc243886598](http://landschapsleutel.wur.nl/documentatie/htm/Legendas%20Bodemkaarten.htm#_Toc243886598).

---

## KADER BODEMFYSISCHE EENHEDEN KAART (BOFEK)

Voor het beschrijven en modelleren van het transport van water en opgeloste stoffen in de bodem wordt gebruik gemaakt van bodemfysische eenheden (Wösten *et al.*, 2013). Dit zijn gebieden met een overeenkomstige bodemopbouw en een overeenkomstige hydrologisch gedrag. De indeling is afgeleid van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000. Er worden 72 verschillende eenheden onderscheiden. De eenheden zijn genummerd, waarbij de honderdtallen de hoofdgrondsoort aangeven (101, 102, enz.: veengronden, 201, 202, enz.: moerige gronden, 301, 302, enz.: zandgronden, 401, 402, enz.: kleigronden en 501, 502, enz.: leemgronden).

Aan een bodemfysische eenheid is een geschematiseerd bodemprofiel gekoppeld en aan de afzonderlijke lagen in het bodemprofiel kunnen belangrijke bodemfysische karakteristieken worden toegevoegd. Aan de hand van de profielschetsen van de bodemeenheden zijn de functionele kenmerken berekend:

- Hoeveelheid gemakkelijk opneembaar vocht in de wortelzone.
- Hoeveelheid moeilijk opneembaar vocht in de wortelzone.
- Weerstand voor verticale stroming (C-waarde, in dagen) van het profiel tussen maaiveld en 1,20 m -mv.
- Maximale diepte van de grondwaterstand waarbij een flux van 2 mm/d de onderkant van de wortelzone (bij pH 4.2) nog kan bereiken (kritieke z-afstand bij 2 mm/d).
- Verzadigingstekort bij een flux van 1 mm/d over de bodemlagen tussen de berekende grondwaterstand en de onderkant van de wortelzone (Vc)

**TABEL 7.1 BODEMTYPEN EN RELEVANTE KENMERKEN**

BODEMTYPE	CODE	MOEDER MATERIAAL	RELEVANTE HYDROLOGISCHE (H) EN GEOMORFOLOGISCHE (M) KENMERKEN
Veengronden	V	Veen	h: kwel en stagnatie van grondwater m: ligging dal-as; input fijn organisch materiaal; cohesieve oevers
Moerige gronden - Broekeerdgronden	W	Veen en zand	h: kwel en stagnatie van grondwater m: ligging dalflank; input fijn organisch materiaal
Dikke eerdgronden - Lage enkeerdgronden	EZg	Zand met humus- houdend dek	h: kwel m: input fijn organisch materiaal; licht cohesieve oevers
Kalkloze en kalkhoudende zandgronden			
- Beekeerdgronden	pZg	Zand	h: (fosiele) kwel
- Gooreerdgronden	pZn	Zand	h: laterale grondwaterstroming
- Vlakvaaggronden	Zn	Zand	h: fluctuerend grondwater, geen kwel of stagnatie m: erosieve bedding en oevers

BODEMTYPE	CODE	MOEDER MATERIAAL	RELEVANTE HYDROLOGISCHE (H) EN GEOMORFOLOGISCHE (M) KENMERKEN
Rivierkleigronden met minerale eerdlaag (eerdgronden)	pR	Klei	
- Liedeerdgrond	pRv	Klei op veen	h: stagnerend grondwater; m: restgeulvulling; cohesieve oevers en bedding; inundatie
- Leek-/woudeerdgrond	pRn	Klei of klei op zand (let op profielverloop)	h: stagnerend grondwater; m: restgeulvulling; cohesieve/erosieve oevers en bedding; inundatie
Rivierkleigronden zonder minerale eerdlaag (vaaggronden)	R	Klei	
- Drechtvaaggrond	Rv	Klei op veen	h: stagnerend grondwater; m: restgeulvulling; cohesieve oevers en bedding; inundatie
- Nesvaaggrond	Ro	Klei op niet gerijpte ondergrond	h: stagnerend grondwater; m: restgeulvulling; cohesieve oevers en bedding; inundatie
- Poldervaaggrond	Rn	Klei of klei op zand (let op profielverloop)	h: stagnerend grondwater; m: restgeulvulling; cohesieve/erosieve oevers en bedding; inundatie
Leemgronden met of zonder minerale eerdlaag (eerdgronden)	(p)L		h: stagnerend grondwater;
- Leek-/woudeerdgrond			m: cohesieve oevers en bedding; input van fijne fractie klastisch sediment;
- Poldervaaggrond			



**TABEL7.2 RELEVANTE BODEMKENMERKEN IN DE TOEVOEGING VÓÓR DE BODEMCODE**

CODE	OMSCHRIJVING TOEVOEGING	RELEVANTE HYDROLOGISCHE (H) EN GEOMORFOLOGISCHE (M) KENMERKEN
f...	Plaatselijk ijzerrijk, binnen 50 cm -mv beginnend en ten minste 10 cm dik	h: Indicatie voor (fossiele) kwel m: verkitte lagen, cohesieve oevers
g...	Grind ondieper dan 40 cm -mv beginnend	m: variatie beddingsubstraat, beperkt verticale erosie
k...	Zavel- of kleidek 15 á 40 cm dik	m: Indicatie voor inundatie (op zandgronden)
m...	Stenen in de bovengrond	m: variatie beddingsubstraat, beperkt verticale erosie
z...	Zanddek 15 á 40 cm dik	m: oeverwalvorming (op klei en veengronden)

**TABEL7.3 RELEVANTE BODEMKENMERKEN IN DE TOEVOEGING ACHTER DE BODEMCODE**

CODE	OMSCHRIJVING TOEVOEGING	RELEVANTE HYDROLOGISCHE (H) EN GEOMORFOLOGISCHE (M) KENMERKEN
...a	Glauconietklei beginnend tussen 40 -120 cm -mv en ten minste 10 cm dik	h: schijngrondwaterspiegel m: cohesieve oevers en bedding
...g	Grof zand en/of grind beginnend vanaf 40 cm -mv beginnend	m: variatie beddingsubstraat, beperkt de verticale erosie
...k	Kalksteen of kleefarde, beginnend	m: gesteente, (heuvelland) cohesieve oever en bedding
...m	Oude (rivier)klei beginnend tussen	m: cohesieve oevers
...t		40 -120 cm -mv en ten minste 20 cm dik
...p	Pleistoceen zand beginnend tussen 40 -120 cm -mv	m: erosieve bedding en oevers (in veen- en kleigronden)
...r	(ongerijspte) zavel of klei beginnend tussen 40 -120 cm -mv	m: oude beddingopvulling, cohesieve oevers
...s	Vuursteeneluvium	m: beperkt verticale erosie (heuvelland)
...w	Moerig materiaal beginnend tussen	m: oude beddingopvulling, input fijn
...v	40 en 80 cm -mv of dieper dan 80 cm -mv	organisch materiaal, cohesieve oevers
...x	Keileem of potklei beginnend tussen 40 -120 cm -mv en ten minste 20 cm dik	h: schijngrondwaterspiegel m: cohesieve oevers en bedding

### Landgebruik (zie ook § 5.12 in STOWA, 2017-05)

Het landgebruik is bepalend voor de ontwatering (en afwatering) van gebieden. In tabel 7.4 zijn ter illustratie de normen voor de ontwatering van verschillende vormen van landgebruik weergegeven.

**TABEL 7.4 NORMEN VOOR DE ONTWATERING (MAXIMALE GRONDWATERSTAND) EN DROOGLEGGING (SLOOTPEIL TEN OPZICHTE VAN HET MAAIVELD)**

*Afhankelijk van het landgebruik en bodemtype van de ondergrond (Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).*

LANDGEBRUIK	ONTWATERING	DROOGLEGGING	
		Normaal Water*	Hoog Water**
Grasland	0,30 m	0,85 m (zand/ veen)	0,50 (zand)
		0,90 m (leem/ klei)	0,60 (leem, klei, veen)
Bouwland	0,50 m	0,90-0,95 (zand)	0,50 (zand)
		1,15-1,30 (leem/ klei)	
		1,00-1,10 (veen)	
		0,60 (leem, klei, veen)	
Fruitteelt	0,70 m		
Bos	0,30- 0,50 m		
Industrieterrein	0,50 m		
Stedelijk gebied	0,70 m		

\* mag gemiddeld 1 dag per jaar worden bereikt of overschreden  
\*\* mag 10 á 20 dagen per jaar worden bereikt of overschreden

Bij een gegeven klimaat is het landgebruik tevens bepalend voor de hoeveelheid water die verdampt, zie figuur 7.1. Verdamping is meestal de grootste verliespost van de waterbalans (Nijhuis *et al.*, 2018).

FIG 7.1 VERDAMPING VOOR VERSCHILLENDE VORMEN VAN LANDGEBRUIK (BRAUER, 2017)

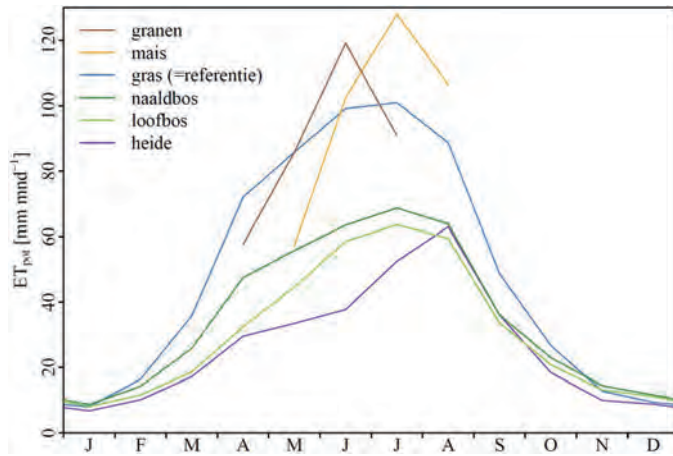
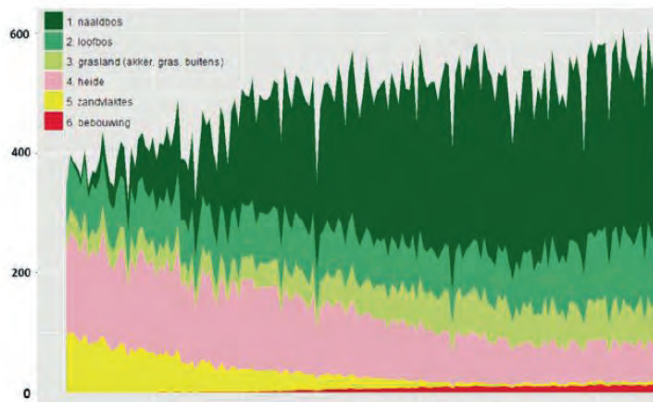


FIG 7.2 DE BIJDRADE PER LANDGEBRUIKSTYPE AAN DE TOTALE ACTUELE VERDAMPING (MM PER JAAR) VAN DE VELUWE

Periode 1850 tot en met 2016 (Nijhuis et al., 2018).



---

Nijhuis *et al.* (2018) hebben berekend wat de effecten van grootschalige historische landgebruiksveranderingen zijn geweest op de waterbalans van de Veluwe. De laatste 150 jaar is het landgebruik van de Veluwe drastisch veranderd. Heide en zandvlaktes zijn grotendeels verdwenen en bossen zijn geplant. De verdamping van bossen is een stuk hoger dan van heide of stuifzand, zie figuur 7.1. Dit komt vooral doordat bomen veel water opvangen in de boomkruin, dat vrijwel direct na een regenbui verdampt (de zogenaamde interceptieverdamping). Vanaf 1850 is de verdamping met ruim 50% gestegen en is de grondwateraanvulling gedaald. De toename van het areaal naaldbos speelt hierin de grootste rol, zie figuur 7.2.

## 7.2 AFVOER

### Metten van de afvoer

Het bepalen (meten) van de afvoer blijkt in de praktijk lastig en levert al snel (grote) fouten op. Metingen met een ADCP lijken het meest nauwkeurig en zijn bovendien ook bruikbaar voor het meten van de bodemhoogte en variatie van stroomsnelheden in het doorstroomprofiel, zie ook bijlage D. Voor een overzicht van methoden om de afvoer te meten zie het Handboek debietmeten in open waterlopen (STOWA, 2009-41).

Indien debieten worden gemeten bij klepstuwen zijn er enkele complicerende factoren die het moeilijk maken om de gebiedsafvoer te bepalen, namelijk:

- 1 De effecten van verdrinking.
- 2 De effecten van de verandering van de hoek  $\alpha$  (t.o.v. de vertikaal) bij klepdaling (wel in nomogram, maar niet in formule).
- 3 De kortstondige toename van het debiet over de stuw als gevolg van de klepdaling zelf, waardoor piekafvoeren worden overschat.
- 4 Het gebruik van de waterhoogten in plaats van de energiehoogten, waarbij wordt aangenomen dat er boven- en benedenstrooms de kruin geen snelheidsverschillen zijn. Bij hogere afvoeren zijn die er juist wel en zeker tijdens verlaging van de klep.

In de handboeken van Boiten (1994 en 1995) en STOWA, 2009-41 en andere literatuur is nog geen universele methode beschreven om af te rekenen met de bovenstaande complicerende factoren.

---

### Typologische referentiewaarden voor de afvoer

In de referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water worden referentiewaarden voor de afvoer gegeven. In tabel 7.5 zijn deze waarden samengevat. De waarden zijn hier opgenomen ter illustratie; ze worden bijvoorbeeld niet gebruikt bij de beoordeling van de hydromorfologische toestand, zie onder andere Osté *et al.*, 2013.

---

**TABEL 7.5 REFERENTIEWAARDEN VOOR DE AFVOER IN NATUURLIJKE WATERTYPEN VOOR DE KRW**

WATERTYPE	LAAG-HOOG (M <sup>3</sup> /S)
Doorstroommoeras	< 1,13 <sup>1</sup>
Moerasbeek	0,02 - 3,08 <sup>1</sup>
Langzaam stromende bovenloop op zand (R4)	0 - 1,13 <sup>2</sup>
Langzaam stromende middenloop/ benedenloop op zand (R5)	0,02 - 3,08 <sup>2</sup>
Langzaam stromend riviertje op zand/ klei (R6)	0,40 - 7,40 <sup>2</sup>
Langzaam stromende rivier/ nevengeul op zand/ klei (R7)	562 - 8000 <sup>2</sup>
Snelstromende rivier/ nevengeul op zand/ grind (R16)	32 - 3305 <sup>2</sup>
Snelstromende bovenloop op kalkhoudende bodem (R17)	0,01 - 2,23 <sup>2</sup>
Snelstromende middenloop/ benedenloop op kalkhoudende bodem (R18)	0,05 - 5,36 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Verdonschot *et al.*, 2016

<sup>2</sup> STOWA, 2012-31

---

### Hydrologische afvoerroutes

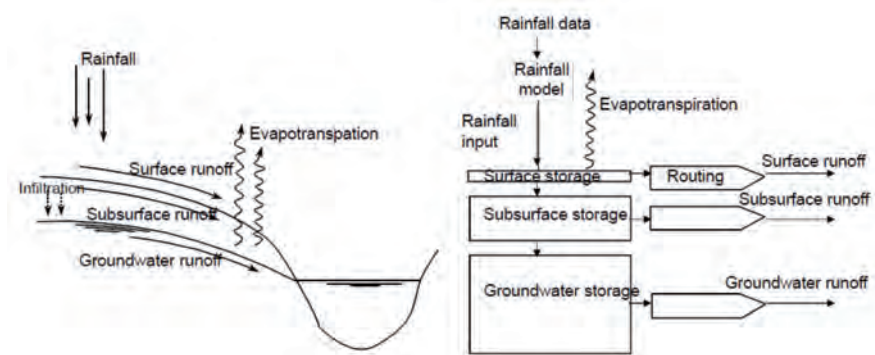
Afstroming van regenwater naar waterlopen is een complex proces. Uiteindelijk is alle afvoer afkomstig van neerslag. Er zijn verschillende routes waarop de neerslag het waterlopenstelsel kan bereiken, zie ook figuur 7.3:

- Neerslagafstroming langs de oppervlakte ('overland flow' of 'surface runoff');
- Via de onverzadigde, ondiepe zone ('interflow' of 'subsurface runoff');
- Via het grondwater (basisafvoer, 'baseflow' of 'groundwater runoff').

De relatieve verhouding van de verschillende deelstromen hangt af van de eigenschappen van de ondergrond, de topografie en (meestal) de waterhoogte in de waterloop. Daarnaast kan deze verhouding variëren in de tijd (Wolfs en Willems, 2018a).

Informatie over afvoerroutes is van belang om het afvoerpatroon te kunnen begrijpen: hoe reageert de afvoer op neerslag? Daarnaast is informatie over de afvoerroutes van belang voor de waterkwaliteit: afhankelijk van de herkomst en de verblijftijd heeft elke afvoerroute een andere samenstelling. Dit is onder andere van belang voor de analyse van de belasting, onder andere met nutriënten (zie van Ek *et al.*, 2018).

**FIG 7.3 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN TYPISCH GEBIEDSGEMIDDELD CONCEPTUEEL NEERSLAG-AFSTROMINGSMODEL (WILLEMS, 2013)**



### Geulvormende afvoer

Bij de analyse van het geomorfologisch functioneren van beken en rivieren wordt gebruik gemaakt van de geulvormende afvoer. Dit is de afvoer die bepalend is voor de natuurlijke dimensies van de waterloop in de evenwichtssituatie. Deze afvoer ligt ergens tussen de lage en de hoge afvoeren in: hoge afvoeren kunnen weliswaar veel sediment verplaatsen, maar komen weinig voor en duren slechts kort; lage afvoeren komen vaker en langduriger voor, maar verplaatsen weinig sediment (STOWA, 2015-02). De geulvormende afvoer heeft in Nederland een statistische herhalingsperiode van 1,58 jaar; de jaarlijkse of tweejaarlijkse piekafvoer vormen een goede maat voor de geulvormende afvoer (STOWA, 2015-02).



In de praktijk gelden de volgende kenmerkende waarden voor de geulvormende afvoer in beken en rivieren:

**TABEL 7.6 KENMERKENDE WAARDEN VOOR DE GEULVORMENDE AFVOER VOOR VERSCHILLENDE RIVIERTYPEN (B. MAKASKE EN G. MAAS, PERS. MED.)**

WATERTYPE	GEULVORMENDE AFVOER (M <sup>3</sup> /S)
Bovenloop beek	< 1
Benedenloop beek	1 - 10
Riviertje (Dommel, Dinkel, Vecht)	10 - 100
Rivier (Rijntakken, Maas)	>> 100

#### **Methoden voor de evaluatie van het afvoerpatroon**

Beekdieren zijn kwetsbaar voor pieken in het afvoerpatroon. Piekafvoeren leiden tot een verlies van habitat heterogeniteit en variatie (Higler, 2002; Verdonschot en Soons, 2016; Nöges *et al.*, 2014).

#### *Annual coefficient of flow variation (Poff and Ward, 1989)*

Een veel gebruikte maat voor de afvoervariatie is de ‘annual coefficient of flow variation’ (Poff en Ward, 1989). Dit is ‘the average of all years of the mean flow divided by the standard deviation times 100’, ofwel de gemiddelde afvoer (gebaseerd op meerdere jaren), gedeeld door de standaardafwijking van de afvoer maal 100. In tabel 7.7 is de karakterisering van de afvoer volgens Poff and Ward weergegeven.

In aansluiting op deze karakterisering (jaarronde afvoer) en in navolging van Eekhout en Hoitink (2014) wordt voor de ‘annual coefficient of flow variation’ een grenswaarde van 30 aangehouden (Eekhout en Hoitink: ‘rivieren of beken met een natuurlijk gedempte dynamiek’).

**TABEL 7.7 KARAKTERISERING VAN DE AFVOER AAN DE HAND VAN DE 'ANNUAL COEFFICIENT OF FLOW VARIATION' (POFF AND WARD, 1989)**

ANNUAL COEFFICIENT OF FLOW VARIATION	KARAKTERISERING AFVOER	
151,3 (± 37,4)	Harsh intermittent	Sterk onderbroken
88,3 (± 25,9)	Intermittent flashy	Onderbroken en sterk fluctuerend
68,2 (± 22,0)	Intermittent runoff	Onderbroken en fluctuerend
24,2 (± 11,9)	Perennial flashy	Jaarrond en sterk fluctuerend
31,4 (± 7,5)	Perennial runoff	Jaarrond en fluctuerend
20,7 (± 8,6)	Winter rain	Stabiel, gevoed door regen in de winter
26,4 (± 11,2)	Snow + rain	Stabiel, gevoed door smeltsneeuw en regen
27,5 (± 9,3)	Snowmelt	Stabiel, gevoed door smeltsneeuw
10,5 (± 6,1)	Mesic groundwater	Stabiel, gevoed door diep grondwater

**Vuistregel voor zandgronden in Zuid-Nederland**

In Zuid-Nederland wordt de verhouding tussen de jaarlijkse piekafvoer ( $T=1$ ) en de gemiddelde voorjaarsafvoer (april/ mei) gebruikt als maat voor de beïnvloeding van de afvoer door intensieve ontwatering of verhard gebied (Evers en Schipper, 2016; STOWA, 2017-05). Hierbij wordt een grenswaarde van 4 aangehouden, zie tabel 7.8.

**TABEL 7.8 KARAKTERISERING VAN DE AFVOER**

*Aan de hand van de verhouding tussen de piekafvoer ( $T=1$ ) en de voorjaarsafvoer (april/ mei) (Evers en Schipper, 2016; STOWA, 2017-05).*

GRENSWAARDE	KARAKTERISERING AFVOER
> 4	Piekerig afvoerloop
< 4	Natuurlijk afvoerloop

---

### 7.3 VERHANG

Het verhang is de afname van de bodemhoogte of de waterhoogte langs de lengte van de waterloop. Het verhang wordt uitgedrukt in meters per kilometer (m/km), in formules altijd als meters per meter (m/m). Kennis van het verhang is nodig voor het verklaren van (plaatselijke verschillen in) de stroomsnelheid, het bepalen van het dwarsprofiel, het bepalen van de stromingsenergie en voor het sedimenttransport (zie § 7.4 en 7.7).

In de praktijk is er sprake van vier verschillende typen verhang:

- Dalverhang (ook wel: helling van dal of vlakte) (Sv);
- Beddingboderverhang (ook wel: geulgradiënt) (Sg);
- Waterspiegelverhang (Sw);
- Energieverhang (ook wel: energiegadiënt) (Se).

Het verhang wordt bepaald door eerst trajecten met een constant verhang te onderscheiden (en de knikpunten ertussen, als ze er zijn) en dan afname van de bodemhoogte langs een tracé (m) te delen door de lengte van het tracé (m of km), zoals bijvoorbeeld toegelicht in de geomorfologische analyse van de Hooge Raam (Maas *et al.*, 2016) en het Gasterense- en Rolder Diep (Maas, 2018).

#### Dalverhang

Het dalverhang is de afname van de bodemhoogte in de lengte van het beek- of stroomdal. Vaak wordt het dalverhang bepaald via de laagste delen van het dal, dus waar het water zou stromen zonder menselijke beïnvloeding. Voor het bepalen van het dalverhang wordt geen rekening gehouden met (eventuele kronkels in) de waterloop. Van de drie typen verhang is het dalverhang het grootste: in de lengterichting kan er nergens meer verhang aanwezig zijn dan het dalverhang ('steiler kan het niet').

Vermijd voor het bepalen van het dalverhang de zone direct langs de waterloop: deze wordt vaak gebruikt als onderhoudspad en is niet altijd meer representatief voor de bodemhoogte van het beekdal. Verder is het raadzaam om het dalverhang langs meerdere routes te bepalen (bijvoorbeeld linker oever/ rechter oever of in de grote(re) rivieren via de oeverwallen en via de kommen) en over een zo lang mogelijk tracé.

---

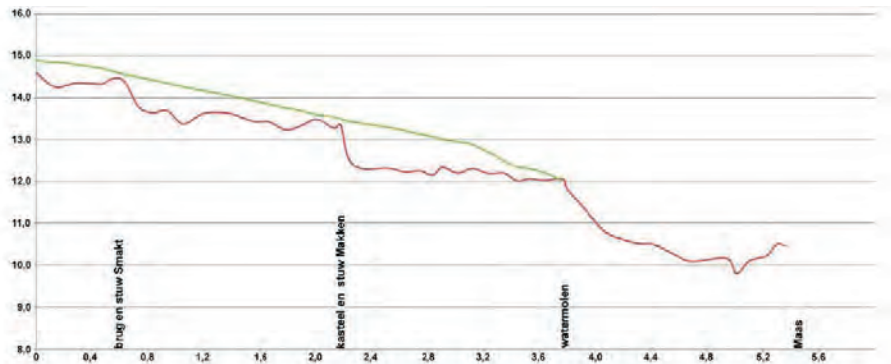
### Beddingboderverhang (geulgradiënt)

Het beddingboderverhang is de afname van de bodemhoogte van de waterbodem langs de lengte van de waterloop. Het beddingboderverhang wordt ook wel de geulgradiënt genoemd. Het beddingboderverhang wordt bepaald door de bodemhoogte langs de as van de waterloop in kaart te brengen. Hierbij wordt de loop van de waterloop gevolgd. Breng bij het in kaart brengen van het beddingboderverhang ook de ligging van belangrijke kunstwerken in beeld (stuwen, duikers, vaste bodems, etc.). Vaak wordt er ook onderscheid gemaakt tussen de bodemhoogte van de slibbodem (sliblaag) en de (harde) ondergrond. Het beddingboderverhang kan zeer grillig zijn, daarom is het hier extra van belang om een langer tracé in beeld te brengen.

---

**FIG 7.4 VERGELIJKING VAN DE BODEMHOOGTE VAN DE VIERLINGSBEEKSE MOLENBEEK (Y-AS IN METERS) IN DE LENGTERICHTING (X-AS IN KM)**

Tussen 1930 (groen) en 2010 (rood) (Kurstjens et al., 2012).



---

### Waterspiegelverhang

Het waterspiegelverhang is de afname van de waterhoogte (het waterpeil) in de lengterichting van de waterloop. Het waterspiegelverhang bepaalt de hoeveelheid energie die het water op de waterbodem uit kan oefenen en is bepalend voor de stroomsnelheid en het sedimenttransport.

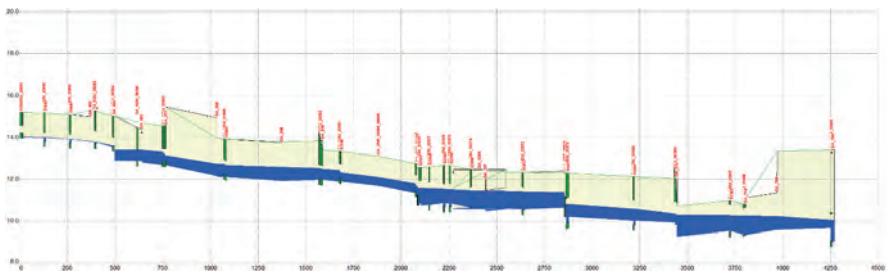
Het waterspiegelverhang komt (net als de stroomsnelheid) tot stand onder invloed van de afvoer, het beddingboderverhang, het dwarsprofiel en de weerstand. De

weerstand wordt veroorzaakt door waterplanten en bochten, maar in de praktijk vooral door stuwen (zie § 7.5). Onder invloed van stuwen is de waterspiegel in veel waterlopen onder de meeste omstandigheden nagenoeg vlak.

Een goede manier om het waterspiegelverhang te bestuderen is het bekijken van zogenaamde 'side-views' in het hydraulische model, zie bijvoorbeeld figuur 7.5. In de 'side view' is het verloop van de waterbodem, de waterspiegel en de waterdiepte in de lengterichting van een (geselecteerde) waterloop af te lezen. Bekijk de side-view bij verschillende afvoersituaties (lage afvoer, gemiddelde afvoer, jaarlijkse piekafvoer). Gebruik hiervoor de statistieken en de afvoerfrequentieverdeling uit § 5.1.

### FIG 7.5 VOORBEELD VAN EEN LENGTEPROFIEL ('SIDE-VIEW') UIT SOBEK

Hierin is de bodem- en waterhoogte (x-as) weergegeven in de lengterichting van de waterloop (y-as). De onderkant van het blauwe vlak geeft de ligging van de waterbodem weer, de bovenkant de waterhoogte. Het gele vlak is de hoogte van het maaiveld, de groene verticale lijnen zijn diverse kunstwerken (duikers, stuwen). In de figuur is te zien dat het bovenste deel van de waterloop (links) bij de getoonde afvoersituatie droog valt.



### Energieverhang

Het energieverhang is de afname van de energiehoogte in de lengterichting langs de waterloop. Onder ideale omstandigheden (eenparige stationaire stroming, zoals een constante stroomsnelheid en waterdiepte en geen turbulentie) is het energieverhang gelijk aan het waterspiegelverhang. Door de continue variatie in de afvoer, de diepte en de stroomsnelheid moet de energiehoogte vrijwel altijd worden berekend. Hiervoor zijn vanuit praktisch oogpunt modellen nodig.

---

#### 7.4 BEDDINGDIMENSIES (DWARSPROFIEL EN LENGTEPROFIEL)

Onder natuurlijke omstandigheden kan op lange termijn onder invloed van afstroming van water een geul ontstaan. Naast de afvoer is het ontstaan van een geul afhankelijk van het verhang en van de samenstelling van het bedding- en oevermateriaal. Daarnaast speelt de vegetatie een rol. Kennis van de beddingdimensies is nodig voor het verklaren van (plaatselijke verschillen in) de stroomsnelheid en daarmee samenhangend de balans tussen erosie en sedimentatie.

Het gemiddelde dwarsprofiel is relatief onveranderlijk en wordt op korte termijn (enkele jaren) meestal als ‘onveranderlijke’ randvoorwaarde beschouwd. Op langere termijn beweegt het dwarsprofiel zich onder invloed van de afvoer, het verhang en de bodemsamenstelling naar een evenwicht. In de praktijk wijken de huidige dimensies nogal eens af van de natuurlijke dimensies, waardoor er sprake is van netto erosie (dimensies te klein) of netto sedimentatie (dimensies te groot).

Meer in detail is de beddingvorm afhankelijk van de aanwezigheid van bochten, obstakels en neren en dynamisch onder invloed van fluctuaties in de afvoer. In bochten treden vooral bij hoge debieten een grotere stroomsnelheid in de buitenbocht en een lagere stroomsnelheid in de binnenbocht op. Dit kan aanleiding geven tot erosie in de buitenbocht waardoor deze wordt uitgediept en een stroomkom ontstaat. Tegelijkertijd kan er aan de binnenbocht en in de rechtstand tussen twee tegengestelde bochten in, sediment worden afgezet waardoor daar zandbanken kunnen ontstaan. Dit kan ertoe leiden dat er een asymmetrisch profiel in de bocht ontstaat. Bij daaropvolgende lagere afvoeren kunnen de stroomkommen weer aanzanden en kunnen de gevormde zandbanken in de rechtstanden tussen bochten (riffles) weer eroderen.

##### **Hydraulische geometrie relaties**

De afmetingen van de bedding van beken en rivieren zijn al vele decennia een inspiratiebron voor diverse onderzoekers en (onder andere Leopold, 2005; Schumm, 1977 en Richards, 1982). Ook heeft men op basis daarvan verschillende hydraulische geometrie relaties afgeleid. Dit zijn empirische vergelijkingen die breedte en diepte via een exponentiële functie relateren aan de afvoer en andere factoren. In het handboek geomorfologisch beekherstel worden enkele van deze



---

hydraulische geometrie relaties genoemd (STOWA, 2015-02). De gebruikte formules zijn beschikbaar via een formuleblad<sup>3</sup>.

Bij het gebruik van de hydraulische geometrie relaties en empirische formules in het algemeen gelden enkele belangrijke beperkingen, zie ook de tekstbox. Deze relaties zijn afgeleid op basis van onderzoek aan riviersystemen in de hele wereld en daarom niet representatief voor de Nederlandse situatie. Bovendien geven de formules vaak een grote spreiding (Verdonschot, 1995, Laseroms, 1996). De berekende referentiegeul kan dus afwijken van de geul die van nature zouden ontstaan, net zoals de referentie-uitkomst van het gooien met twee dobbelstenen gelijk is aan 7 terwijl het best mogelijk is om in een specifiek geval 12 te gooien. Aanbevolen wordt dan ook om de resultaten van de formules kritisch te beschouwen en mee te nemen als indicatie (en niet bepalend) voor de evaluatie en het ontwerp van het dwarsprofiel.

---

**KADER HET WEL EN WEE VAN HYDRAULISCHE GEOMETRIE EN DAARVAN AFGELEIDE VUISTREGELS**

“Estimation of the most probable condition is identical to other procedures in statistics, computing the condition of minimum variance that results not in a forecast, but in a weighing of the inherent variability”. Op de laatste pagina’s van zijn boek ‘View of the River’ (Leopold, 2005) sluit Leopold, de goeroe van de hydraulische geometrie, af dat er niet één bepaalde ‘most probable shape’ of ‘most probable form’ is maar vele. Er is vooralsnog geen fysische wet of manier gevonden om de complexiteit van hydromorfologische processen in stromende wateren te beschrijven in eenvoudige formules. In natuurlijke systemen zal een verandering in de afvoer of de sedimentaanvoer of de ruwheid leiden tot een verandering van meerdere variabelen, waardoor er meerdere combinaties van variabelen zullen zijn die tot een (tijdelijk) dynamisch evenwicht (van de beddingdimensies en de bodemligging) kunnen leiden. Om dit dynamische evenwicht te bereiken is een bepaalde tijd nodig voor aanpassing, maar voordat deze aanpassing is voltooid zijn de variabelen vaak alweer veranderd.

Ook Park (1977) komt na uitgebreid onderzoek naar de coëfficiënten in de hydraulische geometrie relaties (in 139 meetstations en 72 stroomgebieden) tot de conclusie dat er wel degelijk verbanden zijn, maar dat de spreiding erg groot is.

---

3

Zie <https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-geomorfologisch-beekherstel-leidraad-voor-een-stapsgewijze-en-integrale>

---

### Breedte

Conform formule (3) uit het handboek geomorfologisch beekherstel kan de gemiddelde breedte het best geschat worden met behulp van de volgende formule (STOWA, 2015-02):

---

$$W = a * Q^{0.5} = a * \sqrt{Q} \quad (\text{Formule 3})$$

---

Waarbij:

W = geulbreedte (boven-breedte) (m)

Q = geulvormende afvoer (m<sup>3</sup>/s)

a = te bepalen coëfficiënt, zie tabel 7.9 en 7.10

---

**TABEL 7.9 WAARDEN VOOR FACTOR A VOOR ZANDIGE BEDDING ONDER VERSCHILLENDE OMSTANDIGHEDEN**

COËFFICIËNT A	OMSCHRIJVING
3,5	veel weerstand tegen erosie (begroeiing, cohesieve (kleiige/ lemige) oevers)
4	cohesieve (kleiige/ lemige) oevers Overijsselse Vecht
4,7	referentiebreedte voor berekening potentiële specifieke stromingsvermogen
5,62	zandige oevers Overijsselse Vecht
6,5	zandige oevers zonder oeverbegroeiing, goed erodeerbaar

---

**TABEL 7.10 WAARDEN VOOR FACTOR A VOOR GRINDIGE BEDDING ONDER VERSCHILLENDE OMSTANDIGHEDEN**

COËFFICIËNT A	OMSCHRIJVING
1,80	Uiterste bereik Anderson <i>et al.</i> , 2004
2,34	oevers met >50% bedekking met bomen en struiken
2,73	oevers met 5-50% bedekking met bomen en struiken
3	oevers met >50% bedekking met bomen en struiken
3,33	oevers met 1-5% bedekking met bomen en struiken
4,33	grasachtige oevers, tevens uiterste bereik Anderson <i>et al.</i> , 2004

---

---

In [figuur 7.6](#) is de (voorspelde, gemiddelde) geulbreedte weergegeven als functie van de geulvormende afvoer en coëfficiënt  $a$  voor beken (links) en kleine riviertjes (rechts) met een zandbedding (boven) en grindbedding (onder). De voorspelde geulbreedte is erg gevoelig voor de waarde van  $a$ . Met name in de lagere afvoerranges ( $< \text{ca. } 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is de voorspelde geulbreedte ook gevoelig voor de geulvormende afvoer. Verder is te zien dat beken en rivieren met een zandbedding van nature breder zijn dan beken en rivieren met een grindbedding; beken in bodems met een hoge weerstand tegen erosie (lage waarde voor coëfficiënt  $a$ ) zijn bovendien smaller dan beken in bodems met weinig weerstand tegen erosie (hoge waarde voor coëfficiënt  $a$ ).

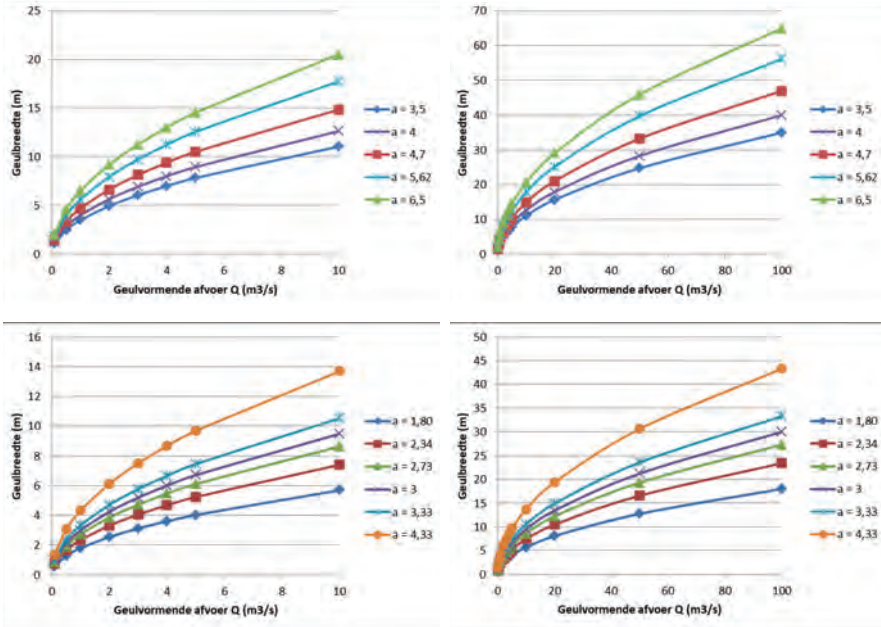
Er is een aantal praktische aandachtspunten bij de toepassing van de formule:

- Voor het schatten van de geulvormende afvoer is het van groot belang dat de afvoerreeks eerst gecontroleerd en gecorrigeerd wordt, onder andere voor gaten in de meetreeks, verdrinking van stuwen, etc., [zie hiervoor § 5.1](#).
- De afvoer kan per locatie verschillen, dus de breedte (en diepte) ook.



**FIG 7.6 GEULBREEDTE ALS FUNCTIE VAN DE AFVOER EN COËFFICIËNT A**

Bij beken (links) en kleine riviertjes (rechts) met een zandbedding (boven) en grindbedding (onder).



### Diepte

De diepte kan het beste geschat worden met de vergelijking van Brownlie, ofwel formule (5) uit het handboek geomorfologisch beekherstel (STOWA, 2015-02). De diepte kan worden geschat op basis van de geulgradiënt, de mediane korrelgrootte van het sediment (D50), de afvoer en sortering van het beddingmateriaal:

$$R = Sg^{-0,2542} * 0,3724 * D50 * Q^{0,6539} * \sigma_s^{0,1050} \quad (\text{Formule 5})$$

Waarbij:

R = hydraulische straal als benadering van de gemiddelde geuldiepte (m)

Sg = geulgradiënt (beddingbodemplang) (m/m, -)

D50 = mediane korrelgrootte van het beddingmateriaal (m)

Q' = dimensieloze afvoer (-)

$\sigma_s$  = sortering van het beddingmateriaal (-)

---

De formule uit het handboek is een benadering voor de gemiddelde diepte (Makasse, pers. med.). In de praktijk kan er onder invloed van de afvoer sprake zijn van de vorming van diepere delen (stroomgeulen) en ondiepere delen (banken) in het onderwaterprofiel. Bij het zakken van het waterpeil komen deze ondiepere delen boven water en zal het water de stroomgeul volgen ('talweg').

Deze formule is in de praktijk vrij lastig te hanteren: er wordt gebruik gemaakt van een 'dimensieloze afvoer' en vaak ontbreekt goede informatie over de samenstelling van het beddingmateriaal (korrelgroottes). Merk verder op dat in deze formule de geulgradiënt, ofwel het beddingbodemverhang wordt gebruikt.

Om de toepassing van deze formule te vergemakkelijken is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de verschillende onderdelen van de formule. Hiervoor is eerst de geuldiepte uitgedrukt als functie van de geulgradiënt, de mediane korrel diameter van het sediment, coëfficiënt  $a$ , de geulvormende afvoer en de sortering van het beddingmateriaal:

---

$$R = Sg^{-0,2542} * 0,3724 * D50 * (a^{-1} Q^{0,5} g^{-0,5} D50^{-1,5})^{0,6539} * \sigma_s^{0,1050} \quad (\text{Formule 5a})$$

---

Waarbij:

$R$  = hydraulische straal als benadering van de gemiddelde geuldiepte (m)

$Sg$  = geulgradiënt (beddingbodemverhang) (m/m, -)

$D50$  = mediane korrelgrootte van het beddingmateriaal (m), gebruik [tabel 7.16\\*](#)

$a$  = te bepalen coëfficiënt, gebruik [tabel 7.9](#) of [7.10\\*](#)

$Q$  = geulvormende afvoer (m<sup>3</sup>/s)

$g$  = zwaartekrachtversnelling = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$\sigma_s$  = sortering van het beddingmateriaal (-), gebruik de waarde 1,05\*

\* zie toelichting in de tekst.

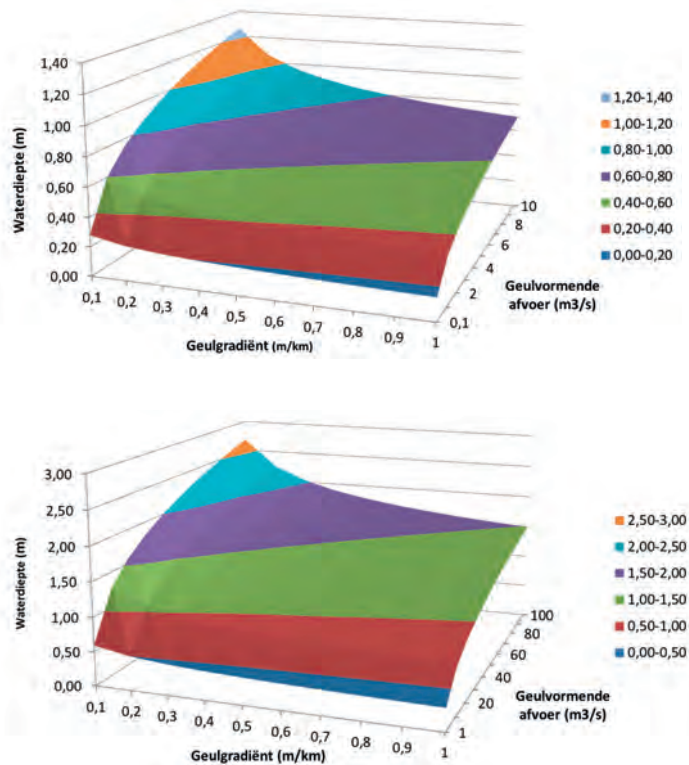
Met behulp van deze formule kan de geuldiepte worden gepresenteerd als functie van de geulgradiënt en de geulvormende afvoer (zie [figuur 7.7](#)) en kan de invloed van de overige factoren worden onderzocht. Uit een nadere analyse in Excel (resultaten hier niet getoond) blijkt dat de mediane korrelgrootte en de sortering van het beddingmateriaal nauwelijks van invloed zijn op de voorspelde diepte. De mediane korrelgrootte kan worden geschat op basis van het aanwezige bodemmateriaal of eventueel de bodemkaart; gebruik hiervoor [tabel 7.16](#). De waarde voor de sortering van het beddingmateriaal ( $\sigma_s$ ) varieert tussen de 0 (uniforme bodem) en

ca. 1,14 (veel variatie in korrelgroottes); gebruik van de waarde 1,05 voldoet in de meeste gevallen. De voorspelde waterdiepte is iets gevoeliger voor de waarde voor coëfficiënt  $\alpha$  en dan vooral bij een lage geulgradiënt en hogere afvoeren. Gebruik tabel 7.9 of 7.10 of anders de waarde 4,7 voor een eerste indicatie.

Uit **figuur 7.7** blijkt dat de voorspelde waterdiepte bij een geulgradiënt  $> 0,30/0,40$  m/km vooral wordt bepaald door de geulvormende afvoer. Bij een geulgradiënt  $< 0,30/0,40$  m/km wordt de voorspelde waterdiepte daarnaast ook sterk bepaald door de geulgradiënt.

**FIG 7.7 GEULDIEPTE ALS FUNCTIE VAN DE GEULVORMENDE AFVOER EN DE GEULGRADIËNT**

*Bij beken (boven) en kleine riviertjes (onder) bij een  $D_{50}$  van  $200 \mu\text{m}$ , coëfficiënt  $\alpha$  van 4,7 en  $\alpha$  van 1,05 (zie toelichting in de tekst).*



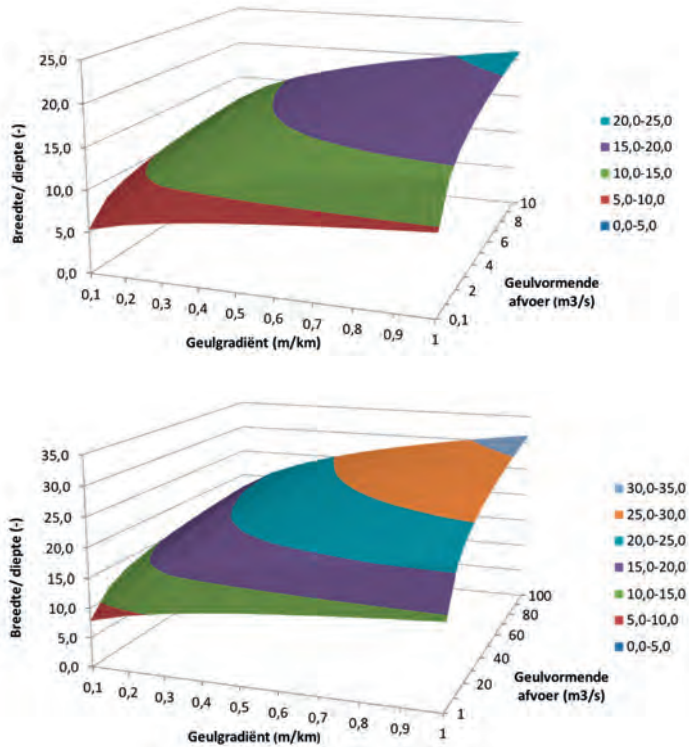


### Breedte/ diepteverhouding (b/d verhouding)

Theoretisch gezien levert de voorspelde geulbreedte gedeeld door de geuldiepte de gemiddelde breedte/ diepteverhouding (b/d verhouding). Deze b/d verhouding is afhankelijk van de geulgradiënt en de geulvormende afvoer, zie figuur 7.8. Uit deze figuur blijkt dat de b/d verhouding toeneemt bij een toenemende geulvormende afvoer en geulgradiënt. Tussen een geulvullende afvoer van 0 en 10 m<sup>3</sup>/s neemt de breedte/ diepte verhouding snel toe.

**FIG 7.8 BREEDTE/ DIEPTEVERHOUDING ALS FUNCTIE VAN DE GEULVORMENDE AFVOER EN DE GEULGRADIËNT**

*Bij beken (boven) en kleine riviertjes (onder) ( $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ , coëfficiënt  $a = 4,7$  en  $os = 1,05$ ).*



---

De breedte/ diepteverhouding is afhankelijk van de weerstand van de bodem en oevers tegen erosie. In de formules voor de breedte en diepte is dit aspect verwerkt in de waarde voor coëfficiënt  $a$  (zie tabel 7.9 en 7.10). De sterkte van de oevers wordt bepaald door de samenstelling van het oevermateriaal, aanwezige vegetatie of kunstmatige oeververdediging (kribben) (Middelkoop *et al.*, 2003). Fijn cohesief bodemmateriaal zoals klei en leem resulteert in een smalle diepe bedding (kleine  $b/d$  verhouding) terwijl grover (weinig cohesief) bodemmateriaal, zoals zand en grind leidt tot een brede ondiepe bedding (grote  $b/d$  verhouding) (Verdonschot, 1995). Dit is te verklaren op grond van het feit dat oevers die uit onsamenhangend grof materiaal bestaan, zoals zand sneller hun stabiliteit zullen verliezen dan oevers die bestaan uit fijn cohesief materiaal zoals klei en leem. Door deze geringere oeverstabiliteit van grof onsamenhangend materiaal zal de bedding zich relatief sneller in de breedte aanpassen dan bij fijner cohesief materiaal.

#### **Vorm van het (onderwater) profiel**

De voorspelde boven-breedte en gemiddelde diepte volgens formule (3) en (5) geven slechts beperkt informatie over de vorm van het profiel. De formules geven bijvoorbeeld geen indicaties voor de vorm van de oevers (steil of flauw), helling van het onderwatertalud en de bodembreedte. Er zijn wel formules beschikbaar voor het voorspellen van grote beddingvormen (banken) en kleinere beddingvormen (stroomribbels), zie hiervoor STOWA, 2015-02 en de voorbeeldtoepassingen in de Hooge Raam (Maas *et al.*, 2016) en het Gasterense Diep (Maas, 2018).

## **7.5 WEERSTAND EN RELATIE MET PLANTENGROEI**

### **Factoren die de weerstand bepalen**

Het waterpeil, de stroomsnelheid en de variatie in de stroomsnelheid hangen sterk samen met de weerstand in de waterloop, zie ook § 2.1 en figuur 2.2. De weerstand in een waterloop wordt bepaald door verschillende factoren:

- Stuwen;
- Groei van planten;
- Bochten (vormweerstand);
- Bodemmateriaal (korrelweerstand).

Van deze factoren moeten we alleen de planten als afhankelijk beschouwen, de overige factoren kunnen worden beschouwd als (initiële,) relatief onafhankelijke eigenschap.

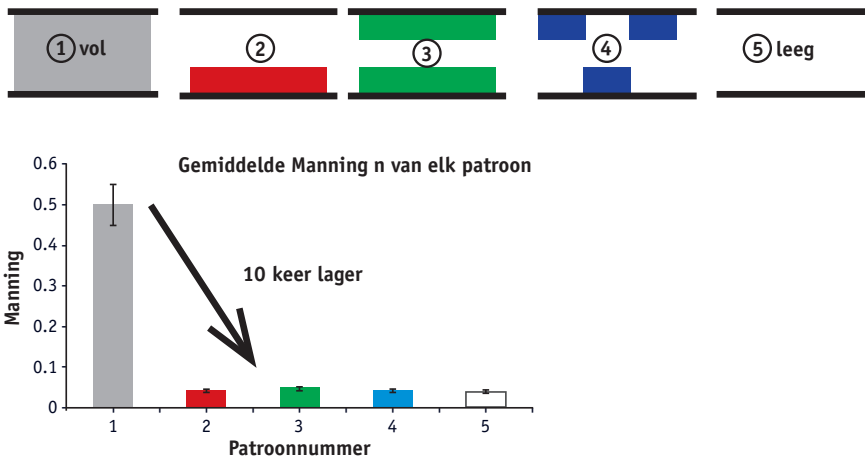
### Groei van planten

In deze uitwerking worden planten alleen beschouwd als weerstandsfactor (zie § 1.3). Voor de voorwaarden/ oorzaken van plantengroei onder invloed van de stroomsnelheid, beschaduwing en verwijdering wordt verwezen naar de uitwerking 'bufferzone en waterplanten' (STOWA, 2018-28). In de uitwerkingen is de onderlinge interactie tussen de groei van planten en de stroomsnelheid buiten beschouwing gelaten.

De stromingsweerstand als gevolg van de begroeiing in de watergang is niet eenvoudig te bepalen (zie onder andere STOWA, 2017-43). De stromingsweerstand is afhankelijk van verschillende factoren:

- De mate van begroeiing van de watergang en de configuratie van de begroeiing (begroeid gedeelte vs. onbegroeid gedeelte), zie bijvoorbeeld figuur 7.9.
- Het type begroeiing (groevormen: ondergedoken waterplanten, drijfbladplanten en bovenwaterplanten).
- De belangrijkste soorten binnen het type begroeiing (sommige soorten veroorzaken veel weerstand, andere soorten minder).
- De waterstand: bij een stijging van de waterstand neemt het doorstroomprofiel toe.

**FIG 7.9 WEERSTAND IN DE WATERLOOP (MANNING N) ALS FUNCTIE VAN PATRONEN VAN BEGROEIING (MEIRE ET AL., 2014)**

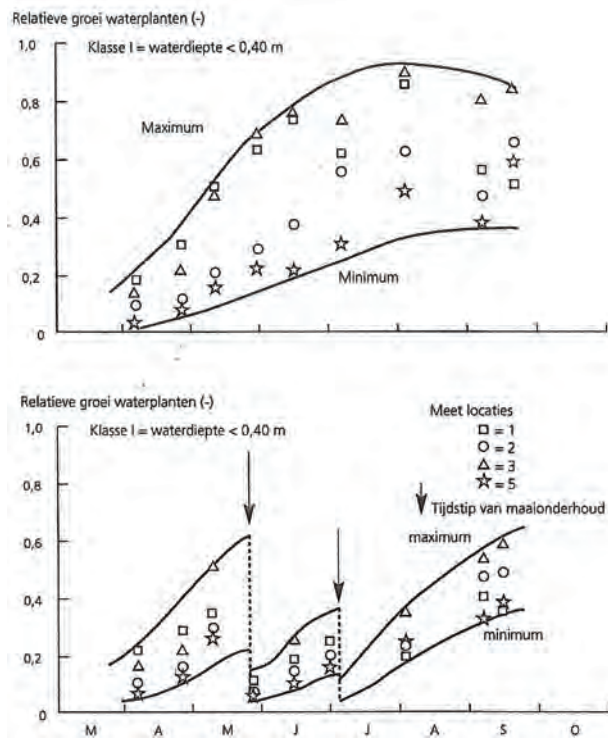


Daarnaast varieert de mate van begroeiing (en de dominante groeivormen en de soorten) in tijd en ruimte:

- Gedurende het seizoen (natuurlijk verloop in de tijd).
- Als gevolg van maaionderhoud ('onnatuurlijk' verloop in de tijd).
- Binnen waterlichamen en tussen waterlichamen als gevolg van variaties in diepte, stroming, bodemsamenstelling, beschaduwing, etc. (variatie in de ruimte).

**FIG 7.10 BEGROEIING VAN EEN WATERLOOP IN TIJD (SEIZOEN) EN RUIMTE (VERSCHILLENDE LOCATIES)**

*In een ongestoorde situatie (boven) en bij maaionderhoud (onder) (Querner, 1995).*



De variatie in de mate van begroeiing is goed weergegeven in [figuur 7.10](#). De figuur laat de mate van begroeiing zien (relatieve groei waterplanten) als functie van de tijd en voor verschillende locaties in een ongestoorde situatie (boven) en bij twee-

---

maal maaionderhoud (onder). Het betreft locaties met een geringe waterdiepte; de figuur geeft dus de meest ongunstige situatie weer (maximale groei; hoe dieper het water, hoe minder de groei van waterplanten). De mate van begroeiing varieert sterk in tijd en ruimte.

### **Peilverloop in begroeide watergangen**

In de jaren 80 en 90 van de vorige eeuw zijn veel metingen gedaan naar het effect van de plantengroei op het peilverloop in een watergang. Op basis van deze metingen is een model afgeleid om het peilverloop in een watergang te berekenen (STOWA, 2017-43). Van dit model is een spreadsheet toepassing gemaakt die het peilverloop in een watergang kan berekenen op grond van de afmetingen van de waterloop, het debiet het (stuw) peil aan de benedenstroomse zijde en soort en de mate van begroeiing op verschillende plaatsen in de waterloop. Met deze spreadsheet-toepassing kunnen daarnaast de effecten berekend worden van een aantal onderhoudsingrepen zoals het maaien van een baan en het eenzijdig maaien van de watergang. Waterschappen kunnen met dit instrument de gevolgen van begroeiing in waterlopen en de effecten van onderhoudsmaatregelen op het peilverloop berekenen.

### **Weerstand in modellen**

Er zijn diverse concepten voor de berekening van de weerstand die in modellen ook verschillend worden toegepast. Zo wordt in riviermodellen vaak gewerkt met de Chezy-waarde en een k-waarde die vooral afhankelijk zijn van de korrelgrootte van het beddingmateriaal. In Sobek2 wordt gebruik gemaakt van één integrale weerstandsfactor voor de weerstand als gevolg van de groei van planten en de wrijving langs bodem en oever. Deze weerstand geldt dan voor een bepaald traject. In theorie zou de weerstandsfactor bij jaarrondberekeningen mee moeten veranderen met de plantengroei (en het type), maar dit is nog niet de praktijk (Sobek2). Bij statische berekeningen (of het doorrekenen van korte afvoerreksen) kan wel de ‘meest passende’ weerstandsfactor voor de door te rekenen situatie worden toegepast. In [tabel 7.11](#) zijn enkele kenmerkende waarden voor de weerstand in waterlopen weergegeven. Er is wel een mogelijkheid om met de formules van Bos & Bijkerk te rekenen, die varieert met de waterdiepte, maar ook daarmee worden niet alle effecten van waterplanten meegenomen.

**TABEL 7.11 KENMERKENDE WAARDEN VOOR DE WEERSTANDFACTOR (KM) IN WATERLOPEN (CULTUURTECHNISCH VADEMECUM, 1988)**

TOESTAND WATERLOOP	WEERSTANDSFACOR KM ( $M^{1/3}/S$ )
Zeer schoon/ geen vegetatie	45 - 30
Schoon	35 - 20
Licht begroeid	25 - 15
Matig begroeid	20 - 10
Vrij sterk begroeid	16 - 5
Zeer sterk begroeid	< 10

De weerstandsfactor  $kM$  wordt in principe bepaald door alles wat wrijving geeft. Dat is verschillend per systeem en per type (mineraal) substraat. In goed beschaduwde beken met weinig vegetatie is dat vooral de ruwheid van de bodem, met alle takjes, bomen en microreliëf. In beken zonder beschaduwing zijn dat vooral de oevervegetatie en de watervegetatie. De vorm (sinuositeit) speelt slechts een beperkte rol. Verder zijn er in modellen mogelijkheden om extra weerstanden te berekenen in bochten en bij kunstwerken.

## 7.6 STROOMSNELHEID

De stroomsnelheid ontstaat als gevolg van de afvoer, het verhang, het dwarsprofiel en de weerstand, zie ook § 2.1 en figuur 2.2. Deze factoren bepalen ook het waterpeil; in feite ontstaat stroming als gevolg van verschillen in het waterpeil (waterspiegelverhang, zie § 7.3).

### Welke stroomsnelheid?

De stroomsnelheid varieert vooral als gevolg van veranderingen in de afvoer. Daarnaast is er sprake van variatie in de stroomsnelheid in de ruimte. Binnen het dwarsprofiel komen op hetzelfde moment verschillende stroomsnelheden voor: aan de randen en bij de bodem stroomt het water het langzaamste, in het midden aan het wateroppervlak het snelste. Daarom is het belangrijk om steeds duidelijk te maken welke stroomsnelheid wordt bedoeld. In modelstudies wordt meestal gerekend met gemiddelde stroomsnelheid; bij metingen (bijvoorbeeld in het kader van de biologische monsternamen) wordt vaak de maximale stroomsnelheid in het profiel bepaald.



### Typologische referentiewaarden voor de stroomsnelheid

In de referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water worden referentiewaarden voor de stroomsnelheid gegeven. In tabel 7.12 zijn deze waarden samengevat. Deze waarden worden gebruikt bij de beoordeling van de hydromorfologische toestand volgens Osté *et al.*, 2013.

**TABEL 7.12 REFERENTIEWAARDEN VOOR DE STROOMSNELHEID IN NATUURLIJKE WATERTYPEN VOOR DE KRW (IN CM/S)**

WATERTYPE	LAAG-HOOG	JAARGEMIDDELDE
Doorstrommoeras		> 0-20 <sup>1</sup>
Moerasbeek		> 0-20 <sup>1</sup>
Langzaam stromende bovenloop op zand (R4)	3-50 <sup>2</sup>	
Langzaam stromende middenloop/ benedenloop op zand (R5)	10-50 <sup>2</sup>	
Langzaam stromend riviertje op zand/ klei (R6)	20-50 <sup>2</sup>	
Langzaam stromende rivier/ nevengeul op zand/ klei (R7)	40-130 <sup>2</sup>	
Snelstromende rivier/ nevengeul op zand/ grind (R16)	50-290 <sup>2</sup>	
Snelstromende bovenloop op kalkhoudende bodem (R17)	50-120 <sup>2</sup>	
Snelstromende middenloop/ benedenloop op kalkhoudende bodem (R18)	50-100 <sup>2</sup>	

<sup>1</sup> Verdonschot *et al.*, 2016

<sup>2</sup> STOWA, 2012-31

**TABEL 7.13 GESCHATTE GRENZEN VOOR DE STROOMSNELHEID IN NATUURLIJKE SYSTEMEN (IN CM/S) (LASEROMS, 1996)**

WATERTYPE	MIN-MAX	JAARGEMIDDELDE
Bovenloop	0-80	20
Middenloop	10-80	30
Benedenloop	0-50	15
Heuvellandbeek	0-100	60

### Grenswaarden voor flora en fauna

Het voorkomen van flora en fauna in stromende wateren wordt vaak primair gerelateerd aan de stroomsnelheid. In multivariate data-analyses komt de stroomsnel-

---

heid vrijwel altijd als eerste bepalende milieufactor uit de bus. De stroomsnelheid is bovendien van groot belang voor (het sedimenttransport en) de vorming van het bodemsubstraat (zie § 2.1) en het zuurstofgehalte (zie van Ek *et al.*, 2018), twee andere belangrijke milieufactoren voor het vóórkomen van aquatische organismen (zie bijlage A).

In de multivariate omgeving is het vrij lastig om één milieufactor te isoleren van de andere milieufactoren: in de praktijk wordt het voorkomen van soorten bepaald door vele milieufactoren tegelijkertijd, die bovendien vaak onderlinge afhankelijkheden vertonen (multi-variate ruimte). Desondanks kunnen er soms wel bepaalde grenswaarden worden benoemd waarboven (of waaronder) bepaalde soorten wel of niet meer vóórkomen.

In het kader van de uitwerking van de ecologische sleutelfactoren is beperkt aandacht besteed aan het zoeken naar dit type grenswaarden (soorten <-> milieufactoren), zie hoofdstuk 1, 8 en 9. Voor de grenswaarde voor de stroomsnelheid in § 4.4 is gebruik gemaakt van de uitwerking 'bufferzone en waterplanten' (STOWA, 2018-28) en twee veel gebruikte referenties voor macrofauna en vissen (Verdonschot en Hoorn, 2005; Kroet *et al.*, 2007).

### *Planten*

In de uitwerking voor bufferzone en waterplanten (STOWA, 2018-28) worden de volgende vuistregels gepresenteerd voor de ontwikkeling van waterplanten in relatie tot de stroomsnelheid:

- Bij stroomsnelheden beneden ca. 20 cm/s kunnen watergangen geheel begroeid raken met waterplanten.
- Bij stroomsnelheden tussen ca. 20 en 40 cm/s ontstaat een pleksgewijs patroon van vegetatie met een min of meer open geul kronkelend tussen de vegetatieplekken waarin het grootste deel van het watertransport plaatsvindt en daartussen dichte vegetaties waar veel minder watertransport plaatsvindt.
- Bij stroomsnelheden tussen ca. 40 en 100 cm/s wordt de vegetatie veel ijler. Alleen soorten die zich aan hoge stroming kunnen aanpassen (zie hierboven) komen voor.
- Bij stroomsnelheden hoger dan ca. 100 cm/s komen vrijwel geen waterplanten voor.

De genoemde grenswaarden komen goed overeen met de grenswaarden voor de ontwikkeling van planten in het Kennisoverzicht kleinschalige maatregelen in Brabantse beken (STOWA, 2017-16), zie tabel 7.14.

**TABEL 7.14** **RELATIE TUSSEN DE GROEI/ONTWIKKELING VAN PLANTEN IN DE STROOMGEUL EN DE GEMIDDELDE STROOMSNELHEID ONDER VOEDSELRIJKE OMSTANDIGHEDEN** (in cm/s) (STOWA, 2017-16)

WATERTYPE	MIN-MAX	GEMIDDELDE
Remming fotosynthese		2-10
Afname biomassa		20-30
Sterke afname biomassa		> 30
Dominantie stromend water specialisten		40-60
Waterplanten zeer schaars		> 80

**TABEL 7.15** **GRENSWAARDEN VOOR DE MINIMUM, MEDIANE EN MAXIMUM STROOMSNELHEID** In relatie tot het voorkomen van stromingsindicatoren (in cm/s) (Verdonschot en van den Hoorn, 2005).

	STROOMSNELHEID					
	Minimum		Mediaan		Maximum	
	3 maanden*	jaar**	3 maanden*	jaar**	3 maanden*	jaar**
≤ 4 stromingsindicatoren	7	2	14	15	45	75
5 stromingsindicatoren	9	3	18	18	55	80
6 stromingsindicatoren	8	4	17	23	60	90
≥ 7 stromingsindicatoren	11-17	3-4	22-33	17-32	60-80	80-120

\* berekend op basis van de gemodelleerde stroomsnelheid in de drie maanden voorafgaand aan de bemonstering  
 \*\* berekend op basis van de gemodelleerde stroomsnelheid in een jaar voorafgaand aan de bemonstering

### Macrofauna

Voor de stroomsnelheidseisen van macrofauna wordt vaak verwezen naar het rapport 'stroomsnelheidseisen voor waterlopen in West-Brabant' van Verdonschot en van den Hoorn (2005), zie onder andere van der STOWA, 2012-31 en Evers en Schipper, 2016. In dit rapport zijn diverse methoden gebruikt om te komen tot grenswaarden voor de stroomsnelheid. In tabel 7.15 zijn de grenswaarden voor de

---

stroomsnelheid in relatie tot het voorkomen van stromingsindicatoren weergegeven. Hierbij is het voorkomen van het aantal stromingsindicatoren gerelateerd aan de (jaarrond gemodelleerde) stroomsnelheid in meerdere beeksystemen. In het kader van REFRESH (REstore FRESHwater ecosystems; <http://www.refresh.ucl.ac.uk/>) zijn tevens de effecten van stagnatie onderzocht. Uit experimenten met stagnatie in laaglandbeken is gebleken dat stromingsindicatoren soorten verdwijnen bij stagnatie na 1 maand (Verdonschot en Soons, 2016; Nöges *et al.*, 2014).

### *Vissen*

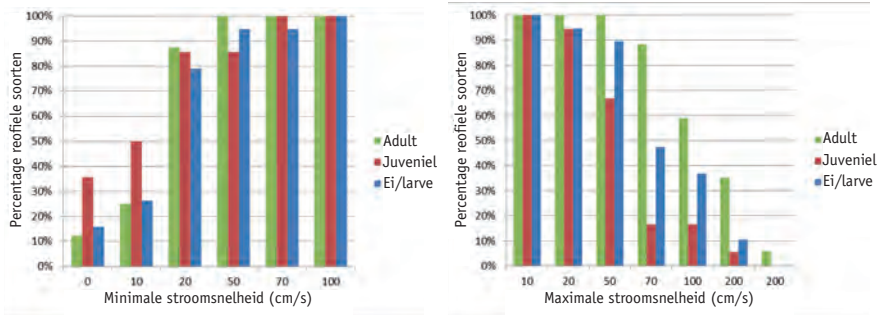
Voor de stroomsnelheidseisen van vissen is gebruik gemaakt van het rapport 'Vis in stromende wateren' (Kroes *et al.*, 2007). In [bijlage 1](#) van dit rapport zijn de belangrijkste habitateisen met betrekking tot paai- en opgroei, voor juveniele stadia en adulte stadia van vissoorten in stromende wateren weergegeven. De meest onderscheidende habitateisen zijn diepte, stroomsnelheid, substraat en beschutting. Voor de stroomsnelheid zijn eisen opgenomen voor de minimale en de maximale stroomsnelheid.

In [figuur 7.11](#) zijn de stroomsnelheidseisen voor de rheofiele vissoorten per levensfase weergegeven. De figuur is gebaseerd op de eisen van alle rheofiele vissoorten voor zover beschikbaar. In de linker figuur is weergegeven welk aandeel van de rheofiele vissoorten bij de weergegeven stroomsnelheid aan eisen voor de minimale stroomsnelheid voldoet. Bij een stroomsnelheid van minimaal 20 cm/s wordt bijvoorbeeld aan de stroomsnelheidseis van ca. 87% van de rheofiele adulten voldaan; bij 50 cm/s is dit 100%. In de rechter figuur zijn de stroomsnelheidseisen voor de maximale stroomsnelheid weergegeven. Een maximale stroomsnelheid van 70 cm/s vormt bijvoorbeeld nog geen probleem voor de adulten (ca. 88% voldoet nog aan de eis voor de maximale stroomsnelheid) maar wel voor de eieren en larven (ca. 46% voldoet aan de eis voor de maximale stroomsnelheid) en de juvenielen (ca. 16% voldoet aan de eis).

Uit de figuur is af te leiden dat het optimum voor alle rheofiele vissoorten tussen de 20 en 50 cm/s ligt. Stroomsnelheden boven de 50 cm/s zijn vooral nadelig voor juvenielen en in mindere mate voor eieren en larven. Daarentegen kan een deel van de soorten in het juveniele stadium ook met minimale stroomsnelheden onder de 20 cm/s uit de voeten.

**FIG 7.11 PERCENTAGE RHEOFIELE SOORTEN DAT BIJ DE AANGEGEVEN STROOMSNELHEID AAN DE EISEN VOOR DE MINIMALE STROOMSNELHEID (LINKS) EN MAXIMALE STROOMSNELHEID (RECHTS) VOLDOET PER LEVENSFASE**

*(op basis van Kroes et al., 2007)*



### *Synthese*

Op basis van bovengenoemde informatie voor het voorkomen van planten, macrofauna en vissen in relatie tot de stroomsnelheid lijkt een waarde van 20 cm/s voor de minimale stroomsnelheid een logische maat. Bij lagere stroomsnelheden is de kans groot dat de waterloop dichtgroeit met planten, met een dominantie van macrofauna- en vissoorten van stilstaand water (vaak gebonden aan planten) tot gevolg. Bij dergelijke omstandigheden verdwijnen ook de stromingsindicatoren voor vissen en (in mindere mate) macrofauna, vgl. tabel 7.15 en figuur 7.11. Een minimale stroomsnelheid van 20 cm/s sluit bovendien goed aan bij de grenswaarden voor de stroomsnelheid in relatie tot het transport van bodemmateriaal (sedimentatie), zie tabel 7.16.

Als bovengrens (maximale waarde) voor de stroomsnelheid lijkt een waarde van 70-80 cm/s een geschikte maat. Boven deze stroomsnelheden komen nauwelijks meer waterplanten voor en wordt de kritische grens van meerdere stromingsindicatoren overschreden, zie tabel 7.15 en figuur 7.11.

---

## 7.7 SEDIMENTTRANSPORT

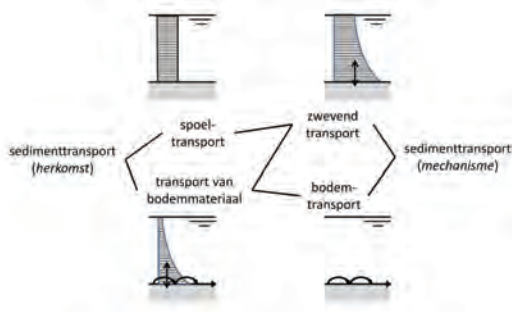
### Vormen van sedimenttransport

Er bestaan verschillende concepten voor de beschrijving van erosie, transport en afzetting van sediment. Welk concept in een specifiek geval van toepassing is, hangt af van de korrelgrootte van het sediment en de sterkte van de stroming (Mosselman, 2018). De verhouding tussen de sterkte van de stroming en de korrelgrootte bepaalt of er sprake is van transport van bodemmateriaal of van spoeltransport (figuur 7.12). De stroming kan bodemmateriaal bewegen als bodemtransport of als zwevend transport. Spoeltransport betreft materiaal dat zo fijn is dat de stroming het meevoert zonder enige wisselwerking met de bodem.

---

FIG 7.12 SOORTEN SEDIMENTTRANSPORT

*Ingedeeld naar herkomst en naar transportmechanisme (Mosselman, 2018).*



---

### Korrelgroottes en zeefkromme

Voor het begrijpen en evalueren van sedimenttransport is kennis nodig over de samenstelling van het beddingmateriaal, ofwel de korrelgroottes van sediment. In tabel 7.16 is informatie over de korrelgroottes van slib, zand en grind opgenomen. De korrelgrootte (of korreldiameter) wordt uitgedrukt in meters (m) of micrometers ( $\mu\text{m}$ ).

De korrel(grootte)verdeling van een monster kan worden bepaald door een zeefanalyse en het opstellen van een zeefkromme. In de zeefanalyse wordt het monster gezeefd door zeven met een afnemende maaswijdte en wordt het gewicht van de zeefrest van de verschillende zeven bepaald (de zeef fracties). De resultaten van de



---

zeefanalyse worden weergegeven in een zeefkromme. Dit is een grafiek waarin de korreldiameter wordt uitgezet tegen het cumulatieve gewichtspercentage.

Een veel gebruikte maat voor de korrelgrootte is de mediane korreldiameter (D50). Dit is de korrelgrootte in een korrelgrootteverdeling waarvoor 50 gewichtspercenten kleiner zijn. Andere gebruikte maten zijn de D16 en de D84, bijvoorbeeld in de formule voor het voorspellen van de diepte van een geul ([formule \(5\) in § 7.4](#)).

### **Metten van sedimenttransport**

De meest toegepaste methode voor het meten/ bepalen van de morfodynamiek is het meten van veranderingen in de bodemligging, m.b.v. ADCP, Multibeam en GPS. Het meten van het sedimenttransport zelf is lastig en levert grote foutmarges (zie bijlage D). Voor een goede analyse van de morfodynamiek is informatie over de korrelgrootte van het substraat noodzakelijk.

### **Formules voor sedimenttransport**

Voor het verklaren van morfologische veranderingen is het gebruik van sedimenttransportformules in combinatie met waterbewegingsmodellen het meest geschikt, zie bijlage D. De reden hiervoor is dat de waterbewegingsmodellen in staat zijn om het hydrodynamische gedrag van de stroming van het water in de bedding te benaderen en de *variatie in waterpeil en stroomsnelheid in ruimte en tijd* te beschrijven; dit is met vuistregels niet mogelijk.

Het meest gebruikte concept in de morfodynamische modellering van rivieren is sedimenttransport dat zich onmiddellijk aanpast aan de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren (Mosselman, 2018). Voorbeelden zijn de transportformules van Meyer-Peter & Müller (1948) en Engelund & Hansen (1967). In combinatie met de sedimentbalans noemt men dit concept het principe van Exner. *Dit betekent dat erosie en sedimentatie op korte termijn samenhangen met gradiënten in de sedimenttransportcapaciteit* (Laseroms, 1996; Mosselman, 2018). Als de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren afneemt, dan kan er sprake zijn van sedimentatie. Erosie kan optreden in situaties waar de sedimenttransport-capaciteit toeneemt. De voorwaarde is dan wel dat het sediment in beweging gebracht kan worden. Tegenwoordig wordt het diagram van Shields (1936) unaniem geaccepteerd voor het begin van sedimentbeweging (Mosselman, 2018).

---

Helaas zijn de aanbevolen formules niet beschikbaar in het waterbewegingsmodel Sobek2. Alternatieve sedimenttransportformules die wel beschikbaar zijn in Sobek2 zijn de formule van Van Rijn en van Frijlink. Voor een goede werking van de formules is wel enige informatie over de korrelgrootteverdeling van het beddingsediment nodig (STOWA, 2015-02).

### **Achtergrondinformatie bij sedimenttransport**

In de literatuur bestaan er diverse benaderingswijzen voor het beschrijven van sedimenttransport. Deze benaderingswijzen zijn *geen alternatief voor de analyse van het sedimenttransport met hydrodynamische modellen en sedimenttransportformules*, maar bieden wel ondersteunende kennis en helpen om de principes achter het transport van bodemmateriaal te begrijpen. Achtereenvolgens worden de volgende benaderingswijzen besproken: de stroomsnelheid, de schuifspanning en het specifieke stromingsvermogen. Deze benaderingswijzen zijn (logischerwijs) sterk verwant, maar hebben allen net een andere insteek.

#### *Sedimenttransport op basis van de stroomsnelheid*

Voor het transport van bodemmateriaal in relatie tot de stroomsnelheid wordt vaak het Hjulström-diagram toegepast. Het diagram laat zien bij welke stroomsnelheid en welke korrelgrootte er sprake is van erosie, transport en sedimentatie (zie figuur 2.16 op p. 71 van STOWA, 2015-02). Het diagram toont het effect van de korrelgrootte (hoe groter de korrel, hoe eerder het deeltje sedimenteert en hoe meer stroomsnelheid er nodig is om het in beweging te krijgen) en consolidatie (kleine deeltjes eroderen minder snel dan verwacht omdat ze ‘aan elkaar plakken’).

Het Hjulström-diagram moet worden beschouwd als een conceptuele poging om het proces van erosie, transport en sedimentatie in beeld te brengen (pers. med. B. Makaske). De stroomsnelheid in het oorspronkelijke Hjulström-diagram (y-as in figuur 2.16) betreft de stroomsnelheid op 1 meter boven de bodem. Dit maakte het Hjulström-diagram niet altijd geschikt voor toepassing in de praktijk (pers. med. B. Makaske).

Om dit te ondervangen heeft Miedema (2010) het Hjulström-diagram aangepast en curves berekend voor erosie bij verschillende waterdiepten. Daarnaast is voor de slibfractie het onderscheid gemaakt tussen losliggend en geconsolideerd slib. De

waarden in tabel 7.16 voor slib, zand en grind zijn hieruit afgeleid. Bij zand en grind heeft de eerste waarde betrekking op een waterdiepte van 0.1 m en de tweede op een waterdiepte van 1 m.

Ook het aangepaste Hjulström diagram geeft niet weer wat er in werkelijkheid gebeurt. *Erosie en sedimentatie hangen niet af van stroomsnelheid, zoals het Hjulström-diagram ten onrechte suggereert, maar van ruimtelijke verschillen in de stroomsnelheid* (Laseroms, 1996; Mosselman, 2018). Dit kan het beste in beeld worden gebracht met modellen en formules voor sedimenttransport.

**TABEL 7.16 BEWEGING VAN SEDIMENT OP BASIS VAN DE STROOMSNELHEID (CM/S)**

ZANDFRACTIE <sup>1</sup>	KORRELGROOTTE <sup>1</sup>	GAAT UIT TRANSPORT BIJ (SEDIMENTATIE)	GAAT IN TRANSPORT BIJ (EROSIE)
Slib (silt-fractie)	2-63 µm	< 1	> 10 <sup>4</sup> (losliggend) >> 35 <sup>4</sup> (geconsolideerd)
Fijn zand <sup>2</sup>	63-210 µm	< 20 <sup>4</sup>	40-50 <sup>4</sup>
Matig grof zand <sup>3</sup>	210-420 µm	< 20 <sup>4</sup>	40-50 <sup>4</sup>
Uiterst grof zand	420 µm-2 mm	< 20 <sup>4</sup>	> 40-> 50 <sup>4</sup>
Grind	> 2 mm	< 35 <sup>4</sup>	> 60-> 80 <sup>4</sup>
Grof organisch materiaal (blad)			> 3,7-5 <sup>5</sup>
Fijn organisch materiaal			

<sup>1</sup> Indeling en benaming volgens NEN 5104

<sup>2</sup> Bestaat uit uiterst fijn zand (63-105 µm), zeer fijn zand (105-150 µm) en fijn zand (105-210 µm)

<sup>3</sup> Bestaat uit matig grof zand (210-300 µm) en zeer grof zand (300-420 µm)

<sup>4</sup> Schatting op basis van het verbeterde Sundborg-Hjulström diagram (Miedema, 2010), voor een waterdiepte tussen 0.1 m (eerste waarde) en 1 m (tweede waarde)

<sup>5</sup> de Brouwer et al., 2017

Een andere methode om te bepalen welk type sedimenttransport mag worden verwacht, is de ratio van de schuifspanningssnelheid en de valsnelheid van sediment ( $u^*/W$ ) (interview Erik Mosselman, zie bijlage D). Als  $u^*/W$  heel groot is, dus als de schuifspanningssnelheid veel groter is dan de valsnelheid, dan treedt vooral zwevend transport op. En als  $u^*/W$  kleiner is, dan is het bodemtransport dominant. De  $u^*$  zegt ook iets over turbulentie en is een maat voor de opwaartse kracht door wervels die op de deeltjes werkt. Als die groot is, dan zal veel sediment in suspensie zijn. Indien de stroomsnelheden lager zijn dan  $W$ , dan zal het bodemmateriaal voornamelijk bestaan uit fijn materiaal en slib.

**TABEL 7.17 VALSNELHEID VOOR DEELTJES VAN EEN BEPAALDE KORRELGROOTTE**

KORRELGROOTTE	VALSNELHEID (W) (CM/S)
63 $\mu\text{m}$	0,33
125 $\mu\text{m}$	1,08
250 $\mu\text{m}$	3,04
500 $\mu\text{m}$	7,4
1 mm	15,5
2 mm	28,3

#### *Sedimenttransport op basis van de schuifspanning*

Als alternatief voor de stroomsnelheid kan ook gekeken worden naar de schuifspanning. De schuifspanning is de kracht die stromend water uitoefent op de bedding. De schuifspanning is als volgt gedefinieerd (STOWA, 2015-02):

$$\tau_b = \rho * g * h * Se \quad (\text{Formule 11})$$

Waarbij:

$\tau_b$  = schuifspanning op de bedding ( $\text{N/m}^2$ )

$\rho$  = dichtheid van water =  $1.000 \text{ kg/m}^3$

$g$  = zwaartekrachtversnelling =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$h$  = waterdiepte (m)

$Se$  = energiegradiënt (m/m; -)

In tabel 7.18 zijn enkele grenswaarden opgenomen voor het in beweging komen van bodemsubstraat. Deze grenswaarden zijn afgeleid uit STOWA, 2015-02, figuur 2.17 op p.73. Wanneer de schuifspanning de kritische waarde overschrijdt, kunnen de sedimentkorrels in beweging komen. De informatie heeft alleen betrekking op zandige en grindige substraten.

Met behulp van deze grenswaarden en formule (11) kan worden afgeleid bij welke combinatie van waterdiepte en energiegradiënt de schuifspanning groot genoeg is om beddingsediment van een bepaalde korrelgrootte in beweging te krijgen. Hiervoor wordt de waterdiepte uitgedrukt als functie van de kritische schuifspanning en de energiegradiënt ( $S_e$ ) (formule 11a). Het resultaat is weergegeven in figuur 7.13.

$$h = \tau_{b,cr} / (\rho * g * S_e) \quad (\text{Formule 11a})$$

Waarbij:

$\tau_{b,cr}$  = schuifspanning op de bedding ( $N/m^2$ ), gebruik een grenswaarde uit tabel 7.18

Uit de figuur blijkt dat zand bijvoorbeeld bij een energieverhang  $\geq 0,1$  m/km en waterdiepte van  $> 20$  cm in beweging kan komen, idem bij een energieverhang  $\geq 0,05$  m/km en waterdiepte van  $> 40$  cm, etc. Voor fijn grind is dit bijvoorbeeld  $\geq 0,1$

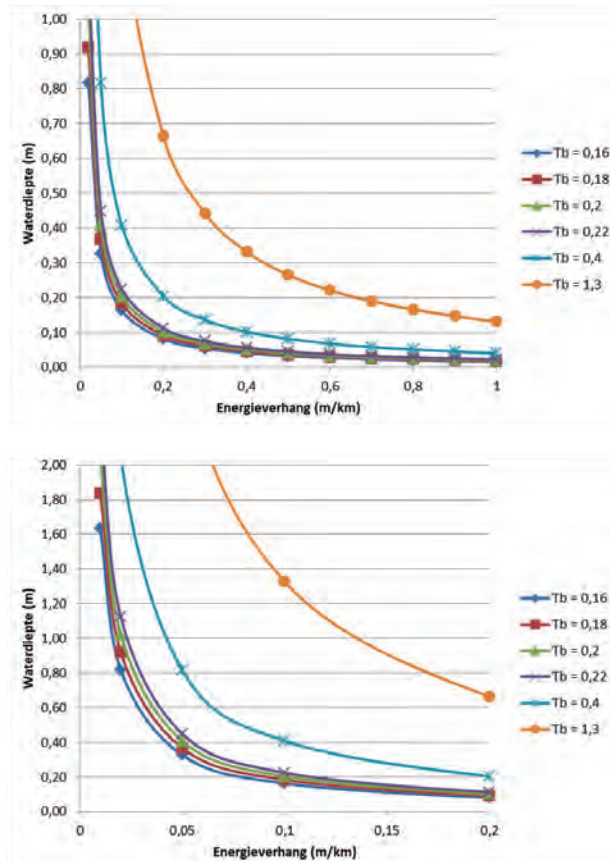
**TABEL 7.18** KRITISCHE SCHUIFSPANNING ( $\tau_{b,cr}$ ) BIJ VERSCHILLENDE KORRELGROOTTES  
Sediment kan in beweging komen als de waarde wordt overschreden (STOWA, 2015-02).

GRENSWAARDE $\tau_{b,cr}$ ( $N/m^2$ )	OMSCHRIJVING
$> 0,16$	zeer fijn zand van $100 \mu m$ komt in beweging
$> 0,18$	fijn zand van $200 \mu m$ komt in beweging
$> 0,2$	zand van $300 \mu m$ komt in beweging
$> 0,22$	matig grof zand van $400 \mu m$ komt in beweging
$> 0,4$	uiterst grof zand van $800 \mu m$ komt in beweging
$> 1,3$	grind van $2000 \mu m$ komt in beweging

m/km en  $> 40$  cm,  $\geq 0,05$  m/km en  $> 80$  cm, etc. Op grond van deze fysische wetten is de conclusie dat zandig bodemsubstraat vrij snel in beweging kan komen: in de praktijk zijn het aanwezige verhang en de waterdiepte vaak groter en resulteren dus in een schuifspanning die groter is dan de kritische schuifspanning.

**FIG 7.13 WATERDIEPTE ALS FUNCTIE VAN DE KRITISCHE SCHUIFSPANNING EN HET ENERGIEVERHANG (BOVEN) MET EEN UITSNEDE VOOR HET BEREIK TUSSEN 0 EN 0,2 M/KM (ONDER)**

De lijnen verbinden de punten met een gelijkblijvende schuifspanning ('iso-schuifspanningslijnen'). Bij combinaties van het energieverhang en de waterdiepte rechts van deze lijnen kan bodemmateriaal met de bijbehorende korrelgrootte in beweging komen.





---

### *Sedimenttransport in relatie tot het stromingsvermogen*

De afvoer, het verhang en de dimensies bepalen samen de hoeveelheid energie die het water per vierkante meter op de bodem uit kan oefenen. Het stromingsvermogen is de afname van de potentiële energie van een rivier per eenheid van lengte (W/m). Het is een maat voor het vermogen van een rivier om sediment te eroderen en te transporteren, hetgeen resulteert in morfologische veranderingen (Middelkoop *et al.*, 2003). De lokale sterkte van de stroming wordt het best aangegeven met het stroomvermogen per eenheid van geulbreedte, het specifieke stroomvermogen (W/m<sup>2</sup>). Het specifieke stroomvermogen wordt eveneens gebruikt om verschillende morfologische riviertypen te classificeren (recht, meanderend of vlechtend), zie STOWA, 2015-02.

Het stromingsvermogen wordt bepaald volgens formule (1) van het handboek geomorfologisch beekherstel (STOWA, 2015-02). Het stromingsvermogen wordt uitgedrukt in Watt per vierkante meter waterbodem (W/m<sup>2</sup>).

---

$$\omega = \rho * g * Q * S / W \quad (\text{Formule 1})$$

---

Waarbij:

$\omega$  = specifiek stromingsvermogen (W/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = dichtheid van water = 1.000 kg/m<sup>3</sup>

$g$  = zwaartekrachtversnelling = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$Q$  = afvoer (m<sup>3</sup>/s)

$S$  = verhang (m/m; -)

$W$  = breedte (m)

---

Afhankelijk van de gebruikte afvoer, het verhang en de breedte is er sprake van verschillende ‘vormen’ van stromingsvermogen:

- *Potentiële specifieke stromingsvermogen*: geulvormende afvoer, dalverhang, breedte van een referentiegeul. De referentiegeul is een geul met een gestandaardiseerde breedte. Deze breedte wordt berekend met de formule uit § 7.4 met coëfficiënt  $a = 4,7$  en  $Q$  = geulvormende afvoer.

Het potentiële specifieke stromingsvermogen is de maximale stromingsenergie die per vierkante meter beschikbaar is voor een referentiegeul. Deze maat is vooral geschikt om de energie van watersystemen met verschillende patro-

---

nen met elkaar te kunnen vergelijken en het natuurlijke patroon af te leiden (recht, meanderend, vlechtend) (STOWA, 2015-02).

- *Werkelijke specifieke stromingsvermogen*: actuele geulvullende afvoer, beddingbodemverhang, actuele geulbreedte. De geulvullende afvoer is de afvoer waarbij de huidige geul net wel/ net niet overstroomt.  
Het werkelijke specifieke stromingsvermogen is de maximale hoeveelheid stromingsenergie die in de actuele situatie (huidige dwarsprofiel en lengteprofiel) per vierkante meter kan optreden. Hierbij wordt er van uitgegaan dat eventueel aanwezige stuwen gestreken zijn en dat het beddingbodemverhang een goede benadering is voor de energiegadiënt (het waterspiegelverhang) in die situatie (zie ook de schuifspanning).
- *Maximale (werkelijke) specifieke stromingsvermogen*: geulvormende afvoer, beddingbodemverhang bij het natuurlijke lengteprofiel (zie § 7.4), geulbreedte zoals voorspeld met de formule uit § 7.4.  
Het maximale werkelijke specifieke stromingsvermogen is de maximale hoeveelheid stromingsenergie die per vierkante meter beschikbaar is, uitgaande van een natuurlijk dwarsprofiel en lengteprofiel en het daarbij behorende beddingbodemverhang. Ook hier wordt ervan uitgegaan dat eventueel aanwezige stuwen gestreken zijn en dat het beddingbodemverhang een goede benadering is voor het waterspiegelverhang in die situatie.
- *Actueel specifieke stromingsvermogen*: actuele afvoer, waterspiegelverhang, breedte van de waterlijn (deze is afhankelijk van het waterpeil).  
Het actueel specifieke stromingsvermogen is de hoeveelheid stromingsenergie die in een actuele situatie per vierkant meter beschikbaar is. In genormaliseerde watersystemen is het actuele specifieke stromingsvermogen bij gemiddelde en lage afvoeren laag omdat het waterpeil gereguleerd is (het waterspiegelverhang is laag) en de afvoer (energie) verdeeld wordt over een grote breedte. In natuurlijke systemen met een fluctuerend waterpeil neemt het specifieke stromingsvermogen dan minder af omdat de breedte van de waterlijn (of de natte dwarsdoorsnede) kleiner wordt bij het uitzakken van het waterpeil (het water volgt de ‘talweg’). In die situatie kan de talweg nog steeds slib, blad en fijn organisch materiaal transporteren.

N.B. Het woordje ‘specifiek’ verwijst naar het feit dat het stromingsvermogen wordt uitgedrukt per eenheid van geulbreedte.

In de literatuur worden diverse grenswaarden genoemd voor het specifieke stromingsvermogen in relatie tot sedimenttransport, zie tabel 7.19. De genoemde grenswaarden in de tabel zijn niet goed met elkaar te rijmen; zo is de grenswaarde voor mobiliseren van het beddingmateriaal ( $0,2 \text{ W/m}^2$ ) niet in overeenstemming met de grenswaarde voor aanzanding, ofwel immobilisatie van zand ( $15 \text{ W/m}^2$ ). De grijs gearceerde grenswaarden worden niet reëel geacht voor de Nederlandse situatie (pers. med. B. Makaske en G. Maas).

**TABEL 7.19 KRITISCHE GRENSSWAARDEN VOOR HET SPECIFIEKE STROMINGSVERMOGEN UIT DE LITERATUUR**

*De grijs gearceerde grenswaarden worden niet reëel geacht voor de Nederlandse situatie.*

GRENSSWAARDE $\omega$ , CR ( $\text{W/M}^2$ )	OMSCHRIJVING
0,2	Beneden deze hoeveelheid energie kan beddingsediment niet gemobiliseerd worden (te gering transporterend vermogen) <sup>1</sup>
2	Minimale potentiële specifieke stromingsvermogen die nodig is voor de vorming van een meanderend lengtepatroon (uitgaande van een mediane korreldiameter van ca. $200 \mu\text{m}$ ) <sup>2</sup> . Deze grens wordt in de praktijk ook wel gebruikt om morfologisch actieve waterlopen te onderscheiden van morfologisch minder actieve waterlopen
10	Overgang tussen laag-energetische en matig energetische waterlopen <sup>3</sup>
10	Minimale hoeveelheid energie die nodig is voor de vorming van de bovenbreedte en de meanderbreedte <sup>4</sup>
15	Beneden deze hoeveelheid energie treedt aanzanding op <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Middelkoop et al., 2003, veld E in figuur 3.4 op p. 32

<sup>2</sup> Maas en Makaske, 2015, figuur 2.10 op p. 55

<sup>3</sup> Rinaldit et al., 2016 naar Nanson en Croke, 1992

<sup>4</sup> Neuteboom Spijker, 2004 in navolging van Nanson en Croke, 1992 in Knighton, 1998

<sup>5</sup> Neuteboom Spijker, 2004, in navolging van FISRWG, 1998

---

### Bronnen voor belasting met sediment

Rivieren transporteren het sediment dat geërodeerd wordt in het stroomgebied. Bij de analyse van het sedimenttransport is het van belang om ook de aanvoer/belasting met sediment te beschouwen. In [tabel 7.20](#) zijn de belangrijkste bronnen voor belasting met sediment weergegeven en hoe ze te bepalen.

De sedimentproductie van stroomgebieden kan worden bepaald via empirische formules op basis van de bodemsamenstelling, bodemgebruik, terreinhellingen en neerslag (Mosselman, 2018). Voorbeelden zijn USLE (Unified Soil Loss Equation) en MUSLE (Modified Soil Loss Equation). Ze lenen zich goed voor implementatie in GIS. Bij extreme neerslag treden ook andere mechanismen van sedimentproductie op, zoals aardverschuivingen, oevererosie en het opbreken van pleisterlagen. Een van de bekende software-systemen voor meer geavanceerde analyses is SWAT (Mosselman, 2018).

Ook de erosiegevoeligheid kan worden gebruikt als (indirecte) maat voor de belasting met sediment. Een methode voor de bepaling van de erosiegevoeligheid van de bodem in het stroomgebied is beschreven door de Waal *et al.*, 2017.

---



**TABEL 7.20 MOGELIJKE BRONNEN/ OORZAKEN VOOR BELASTING MET SEDIMENT**

TYPE SEDIMENT	MOGELIJKE OORZAKEN (HERKOMST)	BRONNEN VAN INFORMATIE
Slib	Afspoeling van landbouwgrond (akkers)	Kaart landgebruik, bodemkaart, relief (AHN) en/of geomorfologische kaart
Zand	Afspoeling van landbouwgrond (akkers)	Bodemkaart, kaart relief (AHN) en/of geomorfologische kaart
	Bodemerosie	Veldwaarnemingen
	Oevererosie	Veldwaarnemingen
	Wind (inwaaien)	Veldwaarnemingen, kaart landgebruik bodemkaart, geomorfologische kaart (stuifzandgebieden)
Grind	Zandwinning	Kaart landgebruik, luchtfoto
	Bodemerosie	Bodemkaart, veldwaarneming
	Oevererosie	Bodemkaart, veldwaarneming
Fijn organisch materiaal* (zie hieronder)	Afbraak van blad	
	Rioolwateroverstort	Kaart watersysteem
	Groei van algen en fyto benthos a.g.v.	
	- belasting vanuit een RWZI	Kaart watersysteem
	- belasting vanuit de landbouw	Kaart landgebruik
Blad**	Oevererosie van venige bodem	Bodemkaart
	Wind (inwaaien)	Veldwaarnemingen, kaart landgebruik bodemkaart, geomorfologische kaart (stofstormen in ontgonnen veengebieden)
	Bomen en struiken in de oeverzone (allochtoon)	Topografische kaart, luchtfoto, veldwaarnemingen
	Plantengroei in de bedding (autochtoon)	Veldwaarnemingen (onderhoud)

\* Zie uitwerking belasting (Schip, S. et al., 2018, STOWA, 2018-30)

\*\* Zie uitwerking water- en oeverplanten (STOWA, 2018-28)

.....



---

## H8 DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN



---

## 8.1 DISCUSSIE

### Ecologische sleutelfactoren

In het licht van de parameters en processen uit § 2.1 valt op dat in de huidige set aan ecologische sleutelfactoren (STOWA, 2015-W06) een belangrijk aspect mist, namelijk het sedimenttransport en de vorming van het bodemsubstraat. De ecologische sleutelfactoren hebben op dit moment vooral betrekking op de factoren die het waterpeil en de stroomsnelheid bepalen, zie figuur 2.8. Hierbij zijn de beddingdimensies, als resultante van het sedimenttransport, wel benoemd (ESFr-Dwarsprofiel). Het ontbreken van het sedimenttransport en de vorming van het bodemsubstraat is opmerkelijk, aangezien het transport van sediment naast het transport van water en de groei van planten beschouwd wordt als één van de drie ecologische sleutelprocessen in stromende wateren. Bovendien vormt het bodemsubstraat een belangrijke factor voor het vóórkomen van aquatische organismen (Tolkamp, 1980; Verdonschot, 1995; Higler, 2002).

Wat betreft de sleutelfactoren valt verder op dat de stroomsnelheid negatief is geformuleerd, als de afwezigheid van stroming (ESFr-Stagnatie). Dit komt wat vreemd over, aangezien stroming over het algemeen als de belangrijkste sturende factor voor stromende wateren wordt beschouwd (tweede 'S' in het 5-S-model; Verdonschot, 1995). In de uitwerking is ervoor gekozen om de stroomsnelheid te beschrijven als onderdeel van de ecologische toestand (abiotisch aspect van de toestand; gevolg). De ecologische sleutelfactor is geformuleerd op het niveau van de oorzaak 'weerstand', waarbij de weerstand als gevolg van stuwen en waterplanten beide in beschouwing worden genomen.

Eenzelfde redenering is ook gevolgd voor de sleutelfactor 'afvoer'. Deze bestaat uit meerdere componenten, waaronder het grondwater, zie § 7.2. Overigens is de aanvoer vanuit het grondwater niet constant, in tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt, zie bijvoorbeeld figuur C.4 (in bijlage C). Bij de omschrijving van de ecologische sleutelfactoren is dit aspect benoemd als aparte sleutelfactor vanwege het belang voor de continuïteit van de afvoer, temperatuur en samenstelling (belasting). Vanuit het gezichtspunt van de systeemanalyse is er echter geen noodzaak om dit aspect als aparte sleutelfactor te benoemen: het grondwater maakt vanzelfsprekend deel uit van de analyse van de afvoer.

---

### **Rol van planten**

Daarbij moet nog eens goed worden gekeken naar de rol van planten binnen de uitwerkingen en binnen het stelsel van ecologische sleutelfactoren. In de uitwerking hydrologie en morfologie is de groei van planten meegenomen als (onafhankelijke) weerstandsfactor, zie de afbakening in § 1.3. In werkelijkheid is de groei van planten niet onafhankelijk en is er bovendien sprake van diverse feed-back mechanismen met hydromorfologische parameters en processen. Zo leidt een daling van de stroomsnelheid in de zomer (in de aanwezigheid van licht) tot meer plantengroei wat weer tot een lagere stroomsnelheid kan leiden. Daarnaast leidt een lage stroomsnelheid doorgaans tot sedimentatie en een voedselrijke en slibrijke bodem, wat de groei van waterplanten stimuleert. Hierdoor stijgt de weerstand en daalt de stroomsnelheid. De wederzijdse interactie tussen de stroomsnelheid, sedimenttransport (lichtklimaat i.r.t. slibtransport), het bodemsubstraat en planten is nu niet in beschouwing genomen in de uitwerkingen.

Wat betreft de ecologische sleutelfactoren is de benoeming van waterplanten als sleutelfactor begrijpelijk: de groei van planten vormt één van de drie ecologische sleutelprocessen in stromende wateren (naast het transport van water en van sediment). In lijn met het gedachtegoed voor stilstaande wateren (STOWA, 2015-17) zijn de ecologische sleutelfactoren echter gericht op de oorzaken voor het ontstaan van de ecologische toestand. De ecologische toestand wordt hierbij breed gedefinieerd, met zowel biotische als abiotische componenten. De plantengroei maakt in die gedachtenlijn dus (net als de stroomsnelheid en het bodemsubstraat) onderdeel uit van de ecologische toestand.

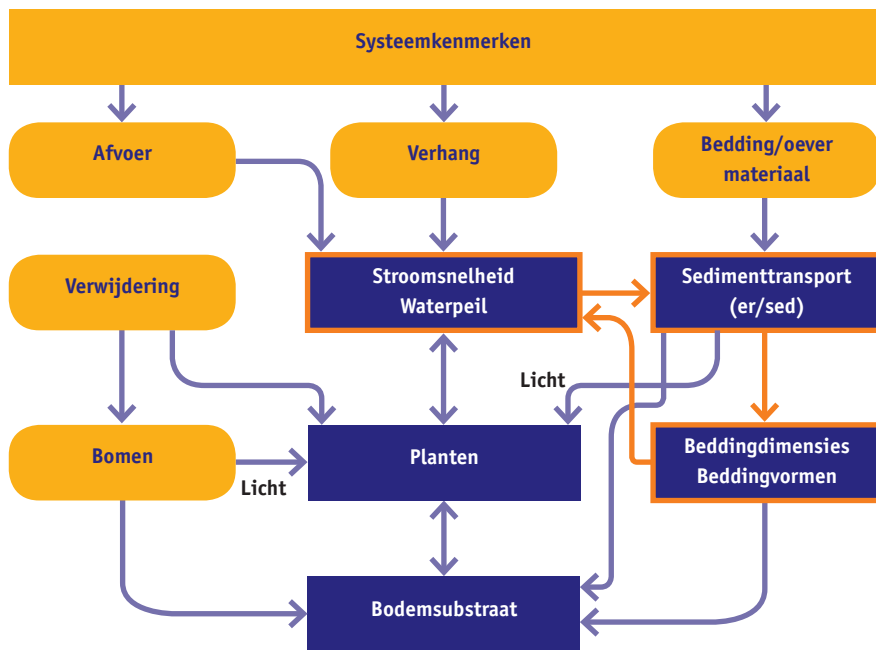
In het verlengde hiervan ligt het meer voor de hand om de sleutelfactoren te zoeken in de richting van de oorzaken voor de groei van planten, te weten licht (bomen) en verwijdering, samen met de oorzaken voor de hydromorfologische toestandsparementen, zie figuur 8.1. Hierdoor wordt tevens de aansluiting met de uitwerking (en filosofie) van de ecologische factoren voor stilstaande wateren verhelderd en versterkt.

### **Relatie met de ecologische toestand**

Bij de uitwerking van de ecologische sleutelfactoren voor stromende wateren was het de bedoeling om ecosysteemtoestanden te ontwikkelen. Een ecosysteemtoestand is een abstracte beschrijving van een situatie van een stromend water. Een

**FIG 8.1 OORZAKEN (GELE OVALEN) VOOR DE HYDROMORFOLOGISCHE PARAMETERS EN DE PLANTENGROEI (TOESTANDPARAMETERS, BLAUW)**

*In de figuur ontbreekt de belasting met nutriënten als belangrijke factor voor de groei van planten (anders dan belasting via het bodemsubstraat).*



ecosysteemtoestand is zonder al te veel achtergrond en vrij eenvoudig in het veld vast te stellen op basis van uiterlijke kenmerken (zowel biotisch als abiotisch). In de praktijk van stromende wateren zijn dit bijvoorbeeld de stroming, het bodemsubstraat en de groei van planten in het water en op de oever. Er zijn natuurlijk meerdere ecosysteemtoestanden mogelijk; samen vormen zij een raamwerk van ecosysteemtoestanden.

Dit raamwerk van ecosysteemtoestanden is van groot belang binnen de ESF-systematiek. Bij de watersysteemanalyse kan de huidige ecologische toestand worden vergeleken met de mogelijke ecologische toestanden in het raamwerk van ecosysteemtoestanden. De vergelijking geeft een eerste indruk van de actuele toestand

---

ten opzichte van andere mogelijke ecosysteemtoestanden. Belangrijker is dat de ecosysteemtoestanden helpen bij de vinden/duiden van de factoren die een rol spelen bij de overgangen tussen de verschillende ecologische toestanden. Een analyse met de ecologische sleutelfactoren helpt dan om duidelijk te krijgen hoe de ecologische toestand kan veranderen en welke (sleutel)factor hiervoor het meest sturend is. De belangrijkste uitdaging voor het benoemen van de factoren die een rol spelen bij de *overgangen tussen* de ecosysteemtoestanden en de bijbehorende grenswaarden is om deze zoveel mogelijk te formuleren op het niveau van de oorzaken, dus (onafhankelijke) factoren die bepalend zijn voor de ecologische toestand die wordt aangetroffen.

Ten tijde van de uitwerking hydrologie en morfologie waren er geen ecosysteemtoestanden beschikbaar. Hierdoor was het niet mogelijk om factoren en grenswaarden te duiden die een rol spelen bij de overgang tussen mogelijke ecologische toestanden. Hierdoor is de relatie tussen de analyse van de hydrologie en morfologie (met gepresenteerde grenswaarden) en de ecologische toestand nog onvoldoende uitgewerkt.

Als (tussen)oplossing is voor de uitwerking in [hoofdstuk 4 en 5](#) gekozen voor het gebruik van parameters die door diverse auteurs (rechtstreeks) in verband zijn gebracht met het voorkomen van soorten en soortgroepen (zoals Verdonschot en van den Hoorn, 2005 en Kroes *et al.*, 2007), de KRW-score voor de ecologische toestand (Evers en Schipper, 2016) of met het algemeen ecologisch of morfologisch functioneren van stromende wateren (zoals Poff en Ward, 1989 en STOWA, 2015-02). In het kader van deze uitwerking is beperkt aandacht besteed aan het zoeken naar grenswaarden tussen soorten (of KRW-scores) en milieufactoren, [zie hoofdstuk 1, 8 en 9](#). De verwachting is dat er op dit punt meer informatie beschikbaar is, vooral in wetenschappelijke kring.

In het licht van de ecologische sleutelfactoren is het wel de vraag of dit een gewenste zoekrichting is. Het voorkomen van flora en fauna in stromende wateren wordt in de praktijk namelijk bepaald door vele milieufactoren tegelijkertijd, die bovendien vaak onderlinge afhankelijkheden vertonen (multivariate ruimte). In deze multivariate omgeving is het vrij lastig om één milieufactor te isoleren van de andere milieufactoren. Bovendien is de informatie over de soorten en milieufactoren vaak zeer beperkt. Er zijn bijvoorbeeld zelden continu meetreeksen van belangrijke

---

milieufactoren beschikbaar, zoals van de stroomsnelheid en het zuurstofgehalte, waardoor het vinden van kritische waarden erg lastig is. Bovendien hebben de verschillende soortgroepen vaak verschillende eisen in tijd en ruimte (en per levensfase).

## **Uitwerking hydrologie en morfologie**

### *Afbakeningen*

Voor en tijdens de totstandkoming is deze uitwerking op een aantal belangrijke punten afgebakend, zie § 1.3. Het is van groot belang dat hier bij de toepassing van de uitwerking rekening mee wordt gehouden. In het bijzonder geldt dit voor de afbakening tot de bedding en tot enkele (veel voorkomende) watertypen. Meerdere auteurs hebben al het belang van de samenhang tussen beek en beekdal benadrukt, zeker in de systeemanalyse (zie onder andere Verdonshot, 2006, STOWA, 2017-05 en STOWA, 2018-28). De huidige afbakening tot de bedding mag geen reden zijn om dit aspect in de watersysteemanalyse buiten beschouwing te laten. Voor de minder voorkomende watertypen, zoals droogvallende bovenlopen en grote rivieren zal steeds goed moeten worden afgewogen in hoeverre de voorgestelde parameters en grenswaarden in hoofdstuk 4 en 5 van toepassing zijn.

### *Afvoer: hydrologische modellering*

In de uitwerking van de sleutelfactoren in hoofdstuk 5 is de hydrologische modellering van stroomgebieden aangedragen als een mogelijke (maar niet noodzakelijke) stap om de gegevens van de afvoer te controleren. In een hydrologische modellering wordt bepaald hoeveel water via welke afstromingsroutes de waterlopen bereikt. Voor een goed begrip van de (natuurlijke) afstroming van water in het stroomgebied is een dergelijke analyse eigenlijk onontbeerlijk: tijdens het kalibratieproces worden inzichten verworven over de dynamica van het stroomgebied, zoals bijvoorbeeld de fracties van de verschillende deelstromen en de snelheid van afstroming. Deze zijn weer van groot belang voor de ecologische toestand; kennis over deze aspecten is van belang om het effect van maatregelen op de ecologische toestand in te kunnen schatten. De modellering van neerslag-afvoer relaties is dan ook een belangrijk punt van aandacht voor de waterbeheerders (zie de aanbevelingen).

De ontwikkeling van de mogelijkheden om modellen te genereren op basis van kenmerken van het stroomgebied, zoals het grondgebruik, staan nog in de kinder-

---

schoenen. De verwachting is dat daarin snel vooruitgang zal worden geboekt. Daarmee worden gedistribueerde modellen makkelijker te genereren en te kalibreren en dat zal de toepassing ervan stimuleren.

#### *Vegetatie (weerstand)*

Er is nog maar beperkt informatie beschikbaar over de relatie tussen de groei en het afsterven van (verschillende soorten) vegetaties in het groeiseizoen en de ontwikkeling van de weerstand, zie bijlage D en § 7.5. Het is wel bekend dat er een grote variatie in weerstand (ruwheden) optreedt als gevolg van verschillende soorten, de verloop van het groeiseizoen, onderhoud, afvoeren en dergelijke, maar niet precies hoe. De ontwikkeling van de weerstand is van belang om de ontwikkelingen in het waterpeil en de stroomsnelheden te kunnen verklaren.

In hydraulische modellen zoals Sobek kan nog niet (eenvoudig) worden gerekend met in de tijd variërende ruwheden. Er zijn recent wel enkele veelbelovende doorbraken op dit terrein geboekt, zoals de modellering van de effecten van vegetatieontwikkeling door Mijke van Oorschot, en de monami van Herman Kernkamp (Deltares), maar deze kunnen nog niet direct of op korte termijn worden toegepast.

#### *Dwarsprofiel*

Het bepalen van de natuurlijke dimensies is van belang voor het evalueren van de huidige dimensies (is de waterloop overgedimensioneerd of niet?) en voor het bepalen van de passende dimensies in een ecologisch herstelproject. De bepaling van de (natuurlijke) dimensies als functie van systeemkarakteristieken zoals de afvoer, het dalverhang en de bodemsamenstelling is veelvuldig onderwerp geweest van onderzoek (zie onder andere Park, 1977 en Leopold, 2005).

Het bepalen van de dimensies gebeurt over het algemeen op basis van hydraulische geometrie-relaties, zie § 7.4, maar de uitkomsten van dergelijke relaties zijn niet nauwkeurig, zie de box 'het wel en wee van hydraulische geometrie-relaties' in dezelfde paragraaf. De relaties geven ook geen indruk van de natuurlijke spreiding (van de breedte en de diepte) en van de vorm van het (onderwater)profiel (steilheid van de oevers, helling van het onderwatertalud en dergelijke). Op dit moment is er echter nog geen praktisch alternatief voorhanden.



---

Om de bezwaren te ondervangen is het de moeite waard om de ontwikkeling van de geometrie in de praktijk te onderzoeken voor de Nederlandse situatie en eventueel betere geometrie-relaties te ontwikkelen (zie [aanbevelingen](#)). Hierbij dient meteen ook aandacht worden besteed aan de vorm van het (onderwater)profiel en de breedte/diepte ratio.

### *Sedimenttransport*

Het sedimenttransport is een proces dat vaak vergeten wordt bij het functioneren van stromende wateren en het evalueren van het ontwerp ten behoeve van beekherstel. De grote rivieren vormen hierop een uitzondering: hier is het sedimenttransport een belangrijk aspect bij de sturing van de waterstromen en bij het toestaan van (natuur)ontwikkelingen in de uiterwaarden. Dat het sedimenttransport voor veel watersystemen een beetje uit beeld is geraakt is wel verklaarbaar: veel ingrepen in het verleden zijn erop gericht (geweest) om het water zoveel mogelijk te beteugelen en te sturen en stabiele waterlopen te creëren met zo min mogelijk dynamiek en sedimenttransport.

Dit heeft tot gevolg dat in veel waterlopen vooral sedimentatie plaatsvindt en dat ze regelmatig gebaggerd moeten worden. Tegelijkertijd leiden aanpassingen in het lengte- en dwarsprofiel nu vaak tot een instabiele morfologische situatie, met grootschalige erosie en sedimentatie en het inzakken van oevers tot gevolg. Dit is niet wenselijk voor ecologische ontwikkeling en het beheer en onderhoud. Gestreefd moet worden naar een 'stabiel dynamisch evenwicht', een situatie waar binnen het aanwezige profiel voldoende dynamiek aanwezig is voor het ontstaan van een stabiel en gevarieerd bodemsubstraat. Een evaluatie van het sedimenttransport zoals geschetst in § 6.2 draagt hier zeker aan bij.

Op dit moment is echter nog weinig ervaring met de evaluatie van het sedimenttransport. Daarbij geldt dat er voor de evaluatie een gekalibreerd hydraulisch model moet worden opgesteld, dat de meest geschikte formules en de parameters zoals voorgesteld door Mosselman (2018) nu niet beschikbaar zijn in Sobek2 en dat het nog lastig is om een goede schatting te maken van de (bovenstroomse) belasting met sediment. Gezien het belang van het sedimenttransport wordt toch aanbevolen om hier op enige wijze een start mee te maken (zie § 6.2 en de [aanbevelingen](#)).

---

### *Vorming van het bodemsubstraat*

Voor de ecologische kwaliteit zijn primair de processen die zich afspelen op het niveau van een habitat relevant. De ecologisch relevante morfodynamiek is de dynamiek van het beddingmateriaal als gevolg van continue fluctuaties in de stroming en het sediment. Er is echter nog erg weinig kennis van de relaties tussen de afvoer- en morfodynamiek en het ontstaan van een gevarieerd bodemsubstraat. We weten inmiddels wel welke voorwaarden in verband kunnen worden gebracht met het ontstaan van het bodemsubstraat (zie figuur 2.6), maar het kwantificeren van de processen is nog een grote uitdaging.

### **Ervaringen met de cases**

Ter ondersteuning van deze uitwerking zijn twee casestudies verricht: de Hooge Raam (waterschap Aa en Maas) en de oosttak van de Drentsche Aa (Gasterense- en Rolder Diep; waterschap Hunze en Aa's), zie ook hoofdstuk 9.

### *Gegevens*

Bij de uitwerking van de casestudies is veel tijd gaan zitten in de inventarisatie en met name in de controle en validatie van deze gegevens en verbetering van de Sobek-modellen. Deze ervaring komt overeen met de ervaring bij eerdere watersysteemanalyses. Het blijkt ook dat er nog niet standaard wordt gewerkt met tools en methoden voor controle en validatie. Ten behoeve van de snelheid en kwaliteit van de watersysteemanalyses is een goede controle en validatie van meetreeksen onmisbaar, zie ook § 5.1. Hierbij gaat de prioriteit uit naar de meetreeksen voor de afvoer (zie aanbevelingen), maar in feite vormt de berekende stroomsnelheid de kern van de analyse. Een goede administratie/organisatie van de data en modellen en het stroomlijnen van de kalibratie, validatie en correctie kunnen zeer veel (tijd) winst opleveren.

Verder is gebleken dat het verzamelen van de gegevens over een watersysteem beschouwd moet worden als een (interactief) proces. In bijlage B is een overzicht gegeven van de benodigde gegevens voor de analyse van de hydrologie en morfologie van een stroomgebied, maar deze informatie is zelden in één keer beschikbaar. Vaak moeten de benodigde gegevens ook (nog) gegenereerd worden uit andere gegevensbronnen. Bovendien ontbreekt vaak informatie over de herkomst en kwaliteit van de beschikbare gegevens, zoals van kwelkaarten en grondwaterkaarten. In het proces van een watersysteemanalyse moet hier rekening mee worden gehouden (reservering van tijd en budget).

---

### *Monitoring*

In een watersysteemanalyse wordt gewerkt met de informatie die beschikbaar is. Uit de casestudies en eerdere watersysteemanalyses is gebleken dat er vaak cruciale informatie ontbreekt of dat deze van onvoldoende kwaliteit of niet beschikbaar is. Hierbij gaat het met name om gegevens van de afvoer, waterstanden op meerdere plekken in het stroomgebied (ook tussen de stuwen), stroomsnelheden en het bodemsubstraat. De laatste twee parameters worden vaak alleen gemeten in het kader van de biologische monsternamen (puntmeting) en zijn bovendien vaak niet gestandaardiseerd en/of digitaal beschikbaar. Hier zijn enkele aanbevelingen voor geformuleerd, zie § 8.2.

### *Hydrologische en hydraulische modellen*

Voor een goede analyse van de afvoer, het waterpeil (incl. de overstromingsduur en -frequentie), de stroomsnelheden en de dynamiek in het watersysteem levert het gebruik van hydrologische en hydraulische modellen zeer veel op. Met modellen kan een goede indruk worden verkregen van het functioneren van het watersysteem in tijd en ruimte, wat bijdraagt aan een goed begrip van het voorkomen van water- en oeverplanten, macrofauna en vissen. Informatie over deze variatie in tijd en ruimte is bovendien onmisbaar voor het beschrijven en kunnen verklaren van morfologische processen die in het veld optreden (erosie en sedimentatie, vorming van stroomribbels en banken).

Meestal zijn er wel modellen van stroomgebieden beschikbaar, maar gebleken is dat deze modellen vaak nog niet direct geschikt zijn voor een goede analyse van de afvoerdynamiek en de morfodynamiek. Uitgangspunt voor de analyse is de beschikbaarheid van een jaarrondberekening. Meestal zijn de modellen opgesteld met een ander doel en hiervoor gekalibreerd (doorgaans hoogwatersituaties, NBW-toetsing). Voor het kunnen verklaren van de ecologische toestand zijn echter ook de gemiddelde en minimale afvoersituaties van belang en deze worden met de beschikbare modellen veelal niet accuraat beschreven.

Doorgaans wordt aangenomen dat het kalibreren van een hydraulisch model voor de jaarrondsituatie relatief veel tijd en energie kost. Dit blijkt erg mee te vallen, de meeste tijd zit vooral in de controle en de validatie van de beschikbare (afvoer-) gegevens, die ook nodig is voor de quickscan en globale analyse. Voor een goed begrip van het watersysteem is deze controle en validatie sowieso noodzakelijk.

---

Hoe dan ook zal de tijd en energie die nodig is voor de analyse met hydraulische modellen goed afgewogen moeten worden tegen de meerwaarde die het biedt voor het begrip van het watersysteem. Omdat de gekalibreerde modellen voor meerdere doelen geschikt zijn, zal de meerwaarde al snel groot zijn.

Bij de uitwerking van de casestudies is gebleken dat analyse van bestaande (Sobek) modellen in de quick-scan zeer veel inzicht oplevert in het functioneren van het stroomgebied, zelfs als de modellen nog niet voldoende goed zijn voor de jaar-rondberekening. Daarmee kan reeds in een vroeg stadium en zeer efficiënt informatie worden verkregen die ook bijdraagt aan een betere inventarisatie en validatie van (meet)gegevens. Indien modellen beschikbaar zijn en in een vroeg stadium worden toegepast, is het onderscheid tussen de quick-scan, de globale analyse en de nadere analyse veel minder groot. Met vroegtijdige inzet van modellen kan de toepassing van de methodiek verder worden gestroomlijnd.

## 8.2 AANBEVELINGEN

Op basis van de uitwerking en de discussie in § 8.1 wordt aanbevolen om:

- De relatie tussen de ecologische sleutelfactoren en de ecologische toestand te versterken door:
  - Het verder uitwerken van ecosysteemtoestanden.
  - De sleutelfactoren te benoemen op de (primaire) overgangen tussen de ecosysteemtoestanden. De sleutelfactoren moeten zoveel mogelijk worden geformuleerd op het niveau van oorzaken, dus (onafhankelijke) factoren die bepalend zijn voor de ecologische toestand die wordt aangetroffen.
  - De uitwerking van de sleutelfactoren toe te spitsen op de grenswaarden tussen de ecosysteemtoestanden.
  
- Bij het benoemen van de ecologische sleutelfactoren tevens rekening te houden met:
  - Het sedimenttransport en de vorming van het bodemsubstraat.
  - De voorwaarden (oorzaken) van de groei van planten als sleutelfactor te benoemen (licht, verwijdering) in plaats van de groei van planten zelf als factor (gevolg).

- 
- Bij de uitwerking van de ecologische sleutelfactoren specifiek aandacht te besteden aan:
    - De relatie tussen stroming en de ontwikkeling van planten. Dit is een belangrijk aspect voor de ecologische ontwikkeling van stromende wateren. In de huidige uitwerkingen is er onvoldoende aandacht geweest voor dit ‘cross-cutting issue’.
    - De overstromingsvlakte en de processen die de (ecologische) ontwikkeling van de overstromingsvlakte bepalen, zoals de overstromingsduur en -frequentie in combinatie met de belasting van het watersysteem met zand en slib.
    - Specifieke parameters en processen in (droogvallende) bovenlopen en grote rivieren, zie § 8.1.
  - Gestructureerd aanvullende informatie te verzamelen over het hydrologisch en morfologisch functioneren van stromende wateren (monitoring), met name over de:
    - Afvoer: minimaal één betrouwbaar meetpunt per stroomgebied, liefst in combinatie met een meetpunt in één of meerdere zijtakken. Indien wordt gekozen voor een jaarrond modellering mag dit ook een waterstandsmeetpunt zijn.
    - Waterstanden: ook op meetpunten tussen de stuwen in en/of op enkele punten in het stroomgebied in combinatie met een betrouwbaar afvoermeetpunt benedenstrooms.
    - Stroomsnelheden: liefst jaarrond op één of enkele vrij afstromende punten in het stroomgebied. Ook het standaardiseren en digitaliseren van stroomsnelheidsmetingen bij de biologische monsternamen is waardevol (planten, macrofauna, vissen), net als het uitvoeren van incidentele metingen op kenmerkende momenten in het seizoen (bij gemiddelde winter –en zomerafvoeren, extremen), zeker in combinatie met een jaarrond modellering van het stroomgebied.
    - Bodemsubstraat: liefst op meerdere momenten in het seizoen. Ook hiervoor geldt dat het standaardiseren en digitaliseren van de opnamen van het bodemsubstraat bij de biologische monsternamen waardevol is.

Zie voor meer informatie en bijpassende methoden bijvoorbeeld STOWA, 2015-11.

- 
- Een universele methode te ontwikkelen om te rekenen met de complicerende factoren voor het bepalen van de afvoer op basis van waterstandsmetingen en klepstanden. In de handboeken van Boiten (1994 en 1995) en STOWA, 2009-41 en andere literatuur is hier nog geen methode voor beschreven.
  - Tools te ontwikkelen voor:
    - De controle en validatie van meetreeksen, met name afvoermeetreeksen.
    - De ontwikkeling van de weerstand (groei van planten) als functie van de tijd en het type vegetatie. Deze tool moet gekoppeld kunnen worden aan waterbewegingsmodellen.
  - De hydrologische modellering van stroomgebieden conform (een van de methoden uit) bijlage C standaard uit te voeren basis voor de controle van de afvoergegevens en ten behoeve van een basaal begrip van de neerslag-afstromingsrelaties in het stroomgebied.
  - Betere stroomgebiedsbrede en hydraulische modellen op te stellen en deze te kalibreren op basis van metingen verkregen uit slimme monitoring. Daarvoor is de koppeling van beiden essentieel; dit zou kunnen worden beschouwd als een eerste stap naar integrale systeemmonitoring.
  - Geautomatiseerde methoden te ontwikkelen voor controle, kalibratie en validatie van hydrologische en hydraulische modellen.
  - Onderzoek te doen naar natuurlijk gevormde dwarsprofielen in Nederland (breedte, diepte, vorm van profiel en natuurlijke spreiding) in relatie tot belangrijkste oorzaken (samenstelling beddingmateriaal, ondergrond, verhang, afvoer, begroeiing). Op basis van dit onderzoek kunnen betrouwbare hydraulische geometrie-relaties voor de Nederlandse situatie worden afgeleid. Dit is van belang voor het kunnen bepalen van een stabiel (onderwater)profiel waarin de kansen op het ontwikkelen van een stabiel en gevarieerd bodemsubstraat zo groot mogelijk zijn (dynamisch evenwicht). Voor de evaluatie van de vorm van het onderwaterprofiel kan hierbij gebruik worden gemaakt van de cirkels van Mohr en vuistregels uit de grondmechanica (Cultuurtechnisch Vademecum).
  - Meer ervaring op te doen met het modelleren van sedimenttransport volgens de methode in § 6.2. Aanvullend kunnen op basis van de uitvoer van Sobek2



---

het verloop van de Shieldsparameter en de breedte-diepteverhouding langs de rivier berekend worden (Mosselman, 2018). Geadviseerd wordt om de resulterende waarden te correleren met waarnemingen van rivierpatronen en riviermozaïeken in het veld, zie hiervoor ook STOWA, 2015-02.

- De standaard hydraulische software van de waterschappen te verrijken met meer geschikte sedimenttransportformules en parameters die geschikt zijn voor de evaluatie van het sedimenttransport (zie Mosselman, 2018).
- De mogelijkheden om het sedimenttransport te berekenen en de gebruikersvragen en -ervaringen op het gebied van sedimenttransport actief mee te nemen bij de ontwikkeling van de software van de toekomst.
- De berekening van de 1D-bodemligging van Sobek RE te integreren in toekomstige software.
- Tools te ontwikkelen waarmee makkelijker bestaande modellen onderling uitgewisseld kunnen worden.
- Methoden te ontwikkelen om de aanvoer van sediment (zowel hoeveelheid als de samenstelling) uit stroomgebieden te meten of te bepalen.
- Nader onderzoek te doen naar het sedimenttransport en andere factoren en het ontstaan van een gevarieerd bodemsubstraat (zie figuur 2.6 en de toelichting in § 2.2). De toepassing van fundamentele kennis over turbulentie en sedimenttransport kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren, net als de voorgestelde methode voor het afleiden van tendensen voor erosie en sedimentatie (Mosselman, 2018) en methoden om beddingvormen zoals stroomribbels en banken te voorspellen (zie § 2.8 in STOWA, 2015-02).

---

# H9 VERANTWOORDING



---

Om te komen tot een methodiek voor de analyse van het hydrologische en morfologische functioneren van stromende wateren, is een aantal stappen gevolgd. Er is begonnen met een inventarisatie van methoden en tools door middel van een literatuuronderzoek en interviews met specialisten (§ 9.1 en 9.2). De resultaten zijn los gerapporteerd in *bijlage D*. Vervolgens is in samenwerking met de overige werkpakketten een relatieschema ontwikkeld om grip te krijgen op de vele parameters en relaties (§ 9.3). Parallel zijn met hulp van enkele specialisten diverse methoden en tools verder onderzocht en toegepast in twee case-studies (§ 9.4). De resultaten zijn verwerkt tot een methode-beschrijving. Hierbij is onderscheid gemaakt naar drie uitwerkingsniveaus: quickscan, globale analyse en nadere analyse (§ 9.5). De begeleiding is verzorgd door een begeleidingscommissie van waterbeheerders (§ 9.6).

## 9.1 LITERATUURONDERZOEK

Een belangrijke eis van de methodiek is dat deze voortbouwt op en gebruik maakt van de aanpak en inzichten uit bestaande methodieken en handboeken. Dit zijn met name het recent verschenen ‘Handboek ecohydrologische systeemanalyse van beekdallandschappen’ (STOWA, 2017-05), een verdieping op de LESA (van der Molen *et al.*, 2010) en het ‘Handboek geomorfologisch beekherstel’ (STOWA, 2015-02). De aanpak en methoden uit deze handboeken zijn zodanig geïntegreerd in de uitwerking van de ecologische sleutelfactoren dat geen dubbel werk nodig is en de benodigde analyses elkaar versterken. Andere richtinggevende documenten voor de uitwerking waren ‘Beken stromen’ (Verdonschot, 1995), de ‘Leidraad ecologisch beekherstel’ (Laseroms, 1996), de ‘Handreiking ontwikkeling waterlopen’ (HOW; Buskens *et al.*, 2012) en de uitwerking door Evers en Schippers (2016) en de ‘Handleiding monitoring beekherstel’ (STOWA, 2015-11).

Daarnaast is gebruik gemaakt van de opgebouwde kennis vanuit internationale literatuur. Hiervan kunnen ‘The fluvial system’ (Schumm, 1977), ‘Rivers’ (Richards, 1982), ‘Tools in Fluvial Geomorphology’ (Piégay en Kondolf, 2003) en ‘Geomorphological change and river rehabilitation’ (Wolfert, 2001) worden beschouwd als ‘standaard-werken’. Daarnaast is ook gebruik gemaakt van de resultaten van specifiek onderzoek, zoals naar de relatie tussen de stroomsnelheid en het transport van blad (Brouwer *et al.*, 2017) en naar de invloed van de paleogeologie op de meanderpatronen in het Gasterense Diep (Candel *et al.*, 2016). Verder zijn de producten van enkele grote onderzoeksprojecten van de EU bekeken in het kader van de

---

methode-beschrijving: MARS (Managing Aquatic ecosystems and water resources under multiple stress; <http://www.mars-project.eu/>), REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management; <http://www.reformrivers.eu/home>) en REFRESH (REstore FRESHwater ecosystems; <http://www.refresh.ucl.ac.uk/>).

Ten slotte is gebruik gemaakt van recente, toepassingsgerichte literatuur met een wetenschappelijke basis zoals de 'Morfodynamiek van Nederlandse laaglandbekken' (STOWA, 2014-15), het 'Kennisoverzicht kleinschalige maatregelen in Brabantse beken' (STOWA, 2017-16) en uit inzichten en ervaringen uit eigen onderzoeken in de Lunterse Beek, de Keersop en het Koningsdiep (zie onder andere Reeze en Laseroms, 2015).

## 9.2 INTERVIEWS

Naast het literatuuronderzoek zijn interviews gehouden met een aantal deskundigen. In deze interviews is geïnventariseerd welke kennis, tools en hulpmiddelen worden gebruikt voor de analyse van het hydrologische en morfologische functioneren van stromende wateren. In totaal zijn 8 deskundigen geïnterviewd: Gilbert Maas (GM; WENR), Ton Hoitink (TH; WUR), Erik Mosselman (EM; Deltares), Patrick Willems en Erik Toorman (PW, ET; Universiteit van Leuven), Petra Dankers (PD; RHDHV), Joris Eekhout (JE; CSIC, Spanje) en Jasper Candel (JC; WUR). Ook Maarten Kleinhans, Bart Makaske en Piet Verdonshot zijn benaderd voor een interview, maar zij konden helaas geen tijd vrijmaken voor een interview. Bart Makaske heeft wel een mondelinge toelichting geven op de toepasbaarheid van de formules uit het handboek geomorfologisch beekherstel (STOWA, 2015-02).

De geïnterviewden hebben vooraf een aantal vragen toegestuurd gekregen ter voorbereiding op het gesprek. De interviews hadden drie hoofdonderwerpen: afvoerdynamiek, morfodynamiek en vegetatieontwikkeling (ruwheden); deze onderwerpen vormen ook de kapstok voor de interviewverslagen. Afhankelijk van de deskundigheid van de geïnterviewde zijn deze onderwerpen diep of minder diep uitgewerkt.

## 9.3 RELATIESCHEMA

In dynamische systemen zoals in stromende wateren is sprake van een grote mate van complexiteit waarbij alle parameters elkaar lijken te beïnvloeden. Dit open proces-respons systeem (Wolfert, 1991) maakt het lastig om de werking van het

---

watersysteem te begrijpen en de oorzaken en gevolgen te onderscheiden. Om dat te ontwarren, eenvoudiger en inzichtelijker te maken, is in samenwerking met de uitwerkingen voor bufferzone en waterplanten, belasting en connectiviteit een relatieschema ontwikkeld. Dit relatieschema is gebaseerd op het zogenaamde 5S-model van Beken Stromen (Verdonschot, 1995) en het model van Ashworth en Ferguson (1986), dat verder is vereenvoudigd (Laseroms, 1996).

Het relatieschema beschrijft de belangrijkste factoren voor hydrologie en morfologie, laat zien hoe de verschillende factoren met elkaar samenhangen (relaties, processen) en maakt onderscheid naar tussen oorzaak en gevolg. Belangrijk zijn vooral de hiërarchie in de beïnvloeding en de terugkoppelingsmechanismen. Verder is essentieel dat men beseft dat al deze relaties dynamisch zijn. Het relatieschema is ook gebruikt in de afstemming en afbakening met de andere werkpakketten (bufferzone en waterplanten, belasting en connectiviteit).

#### 9.4 CASESTUDIES

Op basis van onder kennis en ervaring, het literatuuronderzoek, de interviews en het relatieschema zijn de hoofdelementen voor de analyse onderscheiden: de afvoer, de stroomsnelheid/ het waterpeil en het sedimenttransport (zie § 2.3). Voor elk van deze hoofdelementen zijn de relevante tools en hulpmiddelen voor analyse in beeld gebracht.

Om enkele relatief onbekende, maar veelbelovende tools en hulpmiddelen te testen, zijn ze toegepast in casestudies. Hiervoor is gekozen omdat we in eerdere onderzoeken hebben ervaren dat de toepassing in de praktijk weerbarstig is en dat deze praktijkervaring ook nodig is voor de methodebeschrijving. Daarbij is ook bewust gelet op gebruikersvriendelijkheid en de effectiviteit.

De werking van deze tools en hulpmiddelen is getest aan de hand van twee case studies: de Hooge Raam (Noord-Brabant) en de Drentsche Aa (Drenthe). Van beide gebieden is relatief veel kennis beschikbaar; dit was noodzakelijk om de uitkomsten van de tools en methoden te kunnen toetsen aan de praktijk: kloppen de voorspellingen met de waarnemingen? Het resultaat van de casestudies is tussentijds besproken met de betrokken waterschappen (respectievelijk Aa en Maas en Hunze en Aa's); deze waterschappen leverden ook de benodigde gegevens (kaart materiaal, meetgegevens, input vanuit beheerders, etc.).

---

De casestudies zijn uitgevoerd in samenwerking met de volgende deskundigen:

- Vincent Wolfs en Patrick Willems voor de afvoerdynamiek.
- Erik Mosselman voor de morfodynamiek en sedimenttransport(formules).
- Gilbert Maas voor de toepassing van de formules uit het handboek geomorfologisch beekherstel.

De resultaten van de casestudies zijn integraal verwerkt in de methodebeschrijving (§ 9.5).

## **9.5 METHODEBESCHRIJVING EN ACHTERGRONDINFORMATIE**

Ten slotte zijn de resultaten samengebracht in een methodiek voor de analyse van het hydrologisch en morfologisch functioneren van stromende wateren. In de methodebeschrijving is weergegeven welke analysestappen uitgevoerd moeten worden en hoe de resultaten geïnterpreteerd moeten worden. Om de methodebeschrijving praktisch en overzichtelijk te houden, is de benodigde achtergrondinformatie los gehouden van de methodebeschrijving.



.....

---

# H10 LITERATUUR



- 
- Ashworth, P.J. en R.I. Ferguson, 1986. Interrelationships of channel processes, changes and sediments in a proglacial braided river. *Geografiska Annaler* 68A (1986): 361-371.
- Bakker, T.W.M., J.A. Klijn en F.J. van Zadelhoff, 1979. Duinen en duinvalleien, een landschapsecologische studie van het Nederlandse duingebied. Pudoc, Wageningen.
- Besselink, D., D. Logemann, H. van der Werfhorst, A. Jansen en B. Reeze, 2017. Handboek Ecohydrologische Systemanalyse in Beekdallandschappen. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2017-05.
- BfG, 2001. Strukturgüte-Kartierverfahren für Wasserstraßen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Stand Januar 2001
- Bouwknegt J. en A.J. Gelok, 1992. Hydraulische aspecten van beekmeandering. *Landinrichting* 32: 49-63.
- Buskens, R., I. Barten, M. Kits en H. Vermulst, 2012. Handreiking Ontwikkeling Waterlopen HOW.
- Brauer, C., 2017. Minicursus beekhydrologie. Presentatie in het kader van het symposium 'Ruimte voor de beek. Kansen voor integraal beekherstel met de nieuwe Omgevingswet' van het Platform Beek- en Rivierherstel van 21 september 2017. Zie <https://www.youtube.com/watch?v=1ssh2LBL-RE>.
- Brauer, C.C., Teuling, A.J., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., 2014. The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater. *Geoscientific Model Development* 7, pp. 2313-2332.
- Brauer, C., P. Torfs, R. Teuling en R. Uijlenhoet, 2015. Het uitbreiden en testen van WALRUS: projectrapportage. Leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer, Wageningen Universiteit. April 2014 – oktober 2015.
- Brookes, A. 1988. Channelized rivers: perspectives for environmental management. Wiley, Chichester.
- Brouwer, J.H.F. de, J.P.C. Eekhout, A.A. Besse-Lototskaya, A.F.J. Hoitink, C.J.F. Ter Braak en P.F.M. Verdonchot, 2017. Flow thresholds for leaf retention in hydrodynamic wakes downstream of obstacles. *Ecohydrology* · June 2017. DOI: 10.1002/eco.1883.
- Candel, J.H.J., B. Makaske, J.E.A. Storms en J. Wallinga, 2016. Oblique aggradation: a novel explanation for sinuosity of low-energy streams in peat-filled valley systems. *Earth Surf. Process. Landforms* (2017). DOI: 10.1002/esp.4100.

- 
- Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp, 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel A: Bodem. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Technisch Document 19A; 222 blz.; 20 fig.; 30 tab.
- CEN, 2002. A Guidance Standard for Assessing the Hydromorphological Features of Rivers. Comité Européen de Normalisation/ European Committee for Standardization (CEN), Brussel. EN 14614.
- Chorley, R.J., S.A. Schumm en D.E. Sugden, 1984. Geomorphology. Methuen, London.
- Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Cultuurtechnische vereniging, Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, Utrecht. 1085 p.
- Eekhout, J. en T. Hoitink, 2014. Morfodynamiek van Nederlandse laaglandbeken. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2014-15.
- EG, 2000. Richtlijn 2000/60/EG van het Europees Parlement en de Raad, van 23 oktober 2000, tot vastlegging van een kader voor communautaire maatregelen betreffende het waterbeleid.
- Eisenbeis G. en A. Hänel, 2009. Chapter 15: Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. In: McDonnell, M. J., Hahs, A. H., Breuste, J. H.: Ecology of Cities and Towns, Cambridge University Press, Cambridge 2009, p. 243-263.
- Ek, R. van, J. Mandemakers en S. Schep, 2017. Vingeroefening waterbalans Hooge Raam. Witteveen en Bos, Deventer. Notitie 15 augustus 2017.
- Evers, N. en M. Schipper, 2016. HOW-update 2016. Royal Haskoning, Maastricht Airport. In opdracht van waterschap De Dommel. Referentie: WATBE1732R001F01. 22 juli 2016.
- FISRWG, 1998. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group. GPO item no. 0120-A. Sudoc's No. A 57.6/2:EN3/PT 653. ISBN 0-934213-59-3.
- Griffioen, C., 2017. Peilverloop in begroeide watergangen. Handleiding spreadsheet tool voor het rekenen met het model van Pitlo en Griffioen. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2017-43. ISBN 978.90.5773.767.1.
- Hartong, H. en P. Termes, 2009. Handboek debietmeten in open waterlopen. STOWA, Utrecht. STOWA-rapport 2009-41. ISBN 978.90.5773.450.2.
- Haterd, R.J.W. van de, B.M.C. Grutters, M. Droog, B. Achterkamp, H. Soomers en M.B. Soons, 2018. Tussenrapportage Ecologische Sleutelfactoren Verspreiding & Connectiviteit. STOWA, Utrecht. STOWA-rapport 2018-29.



- 
- Higler, L.W.G., 2002. De relatie tussen de macrofauna in beken en de sleutelfactoren hydraulica en substraat bij veranderend klimaat. Alterra, Wageningen. Alterra-rapport 230.
- Higler L.W.G., H.M. Beijer en W.F. van der Hoek, 1995. Ecosysteemvisie Beken en Beekdalen. IBN/IKC-NBLF, Leersum-Wageningen.
- Hoek, W. van der, H. Gels, B. Worm en G. Schmidt, 2003. Gewässerstrukturgütekartierung in Twente. In: H2O 2003 (8).
- Knighton, D., 1998. Fluvial forms and processes, A new perspective. Department of Geography, University of Sheffield, UK, Arnold, London.
- Koomen, A.J.M. en G.J. Maas, 2004. Geomorfologische Kaart Nederland (GKN); achtergronddocument bij het landsdekkende digitale bestand. Alterra, Wageningen. Alterra-rapport 1039.
- Kroes, M.J., F.T. Vriese en W.A.M. van Emmerik, 2007. Vis in stromende wateren. Deel 1: Doelvariabelen, stuurvariabelen, ingrepen en maatregelen. VisAdvies BV, Utrecht. Projectnummer VA2006\_56B.
- Kurstjens, G., A. van Winden en D. Willems, 2012. Meander met de Molenbeek. Definitief ontwerp herstel Vierlingsbeekse Molenbeek. Hoofdrapport. Kurstjens ecologisch adviesbureau en Stroming, Nijmegen.
- LANUV, 2012. Gewässerstruktur in Nordrhein-Westfalen. Kartieranleitung für die kleinen bis großen Fließgewässer. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen. LANUV Arbeitsblatt 18.
- Laseroms, R. 1996. Ecologisch beekherstel. Dienst Landinrichting en Beheer Landbougrond, Utrecht. Maart, 1996.
- Laseroms, R., 2013. Hydromorfologisch onderzoek Lunterse Beek, LWRO, 's-Hertogenbosch.
- LAWA, 2000. Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser. ISBN-13: 978-3889612335.
- Leopold, L.B., M.G. Wolman en J.P. Miller, 1964. Fluvial processes in geomorphology. Freeman, San Francisco, 522 pp.
- Leopold, L.B., 2005. A view of the river. First Harvard University Press, 2005.
- Maas, 2018. Notitie hydro-geomorfologische analyse Gasterense- en Rolder Diep. Studie in het kader van ecologische sleutelfactoren stromende wateren. Geo-Inspiratie.

- 
- Maas, G., B. van Delft en G. Mol, 2016. Morfologische analyse van de Raamvallei. Wageningen Environmental Research, Wageningen. Concept-rapportage in het kader van Lumbricus.
- Makaske en Maas, 2015. Handboek geomorfologisch beekherstel. Leidraad voor een stapsgewijze en integrale ontwerpaanpak. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2015-02.
- Meire, P., J. Schoelynck, K. Bal, K. Buis en V. Verschoren, 2014. Invloed van waterplanten en maai-beheer op de ecologie en hydrologie van waterlopen. Universiteit van Antwerpen, Antwerpen. Presentatie voor het Platform Beek- en Rivierherstel, Arnhem, 17 April 2014.
- Middelkoop, H., E. Stouthamer, M.M. Schoor, H.P. Wolfert en G.J. Maas, 2003. Kansrijkdom voor rivierecotopen vanuit historisch-geomorfologisch perspectief. Rijntakken - Maas - Benedenrivieren. NCR-publication 21-2003.
- Miedema, S.A., 2010. Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications. WODCON XIX, Beijing China.
- Molen, D.T. van der, R. Pot, C.H.M. Evers en L.L.J. van Nieuwerburgh (red), 2012. Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2015-2021. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2012-31. ISBN 978.90.5773.569.1.
- Molen, P.C. van der, G.J. Baaijens, A. Grootjans en A. Jansen, 2010. LESA. Landschapsecologische systeemanalyse.
- Mosselman, E., 2018. Achtergronden van morfodynamische modellering en advies voor STOWA. Deltares, Delft. Memo 23 januari 2018. Project 11201836-000-ZWS-0006.
- Neuteboom Spijker, R.M.C.L., 2004. Ruimte voor veerkrachtige oppervlaktewater-systemen. De ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van het ruimtebeslag voor de oppervlaktewateren in het beheergebied van Waterschap Veluwe op basis van hydromorfologische processen. Waterschap Veluwe, Apeldoorn. Thesis Larenstein University of Professional Education.
- Nijhuis, K., B. Voortman en F. Witte, 2018. Effecten van historisch landgebruik op de waterbalans van de Veluwe. De Wijerd jaargang 39 nummer 1, maart 2018. Kwartaalblad van de Stichting tot Behoud van de Veluwse Sprengen en Beken.
- Nôges, P., T. Nôges, N. Cid, A.C. Cardoso en M. Kernan, 2014. Stronger need for maintaining environmental flow in streams in a changing climate. REFRESH: Adaptive strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on European Freshwater Ecosystems. Deliverable 7.22. Science Policy Brief 4, January 2014



- 
- Nortier, I.W. en P. de Koning, 1993. Toegepaste vloeistofmechanica, Hydraulica voor waterbouwkundigen. Educaboek, zevende druk, tweede oplage, 1993.
- Osté, A.J., B. de Groot en O. van Dam, 2013. Handboek hydromorfologie 2.0. Afleiding en beoordeling hydromorfologische parameters Kaderrichtlijn Water. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, s.l. 31 mei 2013.
- Park, C.C. 1977. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: an analysis and some observations. *Journal of Hydrology* 33: 133-146.
- Piégay, H. en G.M. Kondolf, 2003. Tools in Fluvial Geomorphology, John Wiley & Sons Ltd.
- Poff, N.L. and J.V. Ward, 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1805-1818.
- Querner, E.P., 1995. De stromingsweerstand en de berekening van de afvoer in begroeide waterlopen. *Het Waterschap* 80 (9): 350-355.
- Reeze, B. en R. Laseroms, 2015. Watersysteemanalyse Koningsdiep op basis van ecologische sleutelfactoren voor stromende wateren. *Ecofide, Weesp*.
- Reeze, B. en J. Lenssen, 2015. Handleiding monitoring beekherstel. Handleiding voor het monitoren van effecten van beekherstelprojecten. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2015-11. ISBN 978.90.5773.668.1.
- Richards, K., 1982. Rivers. Form and Process of Alluvial Channels. Methuen, London and New York, 358 p.
- Rinaldi, M., M. Bussettini, N. Surian, F. Comiti en A.M. Gurnell, 2016. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI). Deliverable 6.2, Part 3, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Schep, S., B. van der Wal en T. van der Wijngaart, 2015. Ecologische sleutelfactoren voor het herstel van onderwatervegetatie. Toepassing van de ecologische sleutelfactoren 1,2 en 3 in de praktijk. Stowa, Amersfoort. Stowa-rapport 2015-17.
- Schep, S., H. Tanis, R. van Ek, M. Fennema, N. Jaarsma en J. Mandemakers, Tussenrapportage Ecologische sleutelfactor Belasting stromend water. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2018-30.
- Schumm, S. A., 1977. The fluvial system. New York, Wiley. 338 p.

- 
- Stevens M.A. 1989. Width of straight alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, vol. 1 13 13.
- STOWA, 2015. Ecologische sleutelfactoren voor stromende wateren. Een methodiek in ontwikkeling. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2015-w06.
- Tolkamp H.H. 1980. Organism substrate relationships in lowland streams. Proefschrift, Wageningen. 211 p.
- Torenbeek, R., B. Grutters, G. van Geest en R. Pot, 2018. Tussenrapportage Ecologische sleutelfactor Bufferzone en Waterplanten. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2018-28.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell en C.E. Cushing, 1980. The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 37: 130-137.
- Verdonschot, P. (red), 1995. Beken Stromen. Leidraad voor ecologisch beekherstel. STOWA/ Werkgroep Ecologisch Waterbeheer, Utrecht. Stowa-rapport 95-03/WEW-06.
- Verdonschot, P.F.M. en M.W. van den Hoorn, 2005. Stroomsnelheidseisen voor waterlopen in West-Brabant. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1166.
- Verdonschot, 2006. Het brede beekdal als klimaatbestendige buffer in de veranderende leefomgeving. Flexibele toepassing van het 5B-concept in Peel en Maasvallei. Alterra/ WUR, Wageningen. 64 p. ISBN 978-90-327-0379-0.
- Verdonschot, 2015. Ecologisch raamwerk voor aquatische ecosystemen. Visie op aquatisch ecosysteem functioneren en afgeleide parameters voor modelontwikkeling en waterbeheer. STOWA, Amersfoort. STOWA-rapport 2015-29.
- Verdonschot, P. en M. Soons, 2016. REFRESH. Adaptive strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on European Freshwater Ecosystems. Beheer van zoete wateren in een veranderende wereld. WUR/ UvA. Presentatie Europese projectendag STOWA.
- Verdonschot, R.C.M., J. Runhaar, A.D. Buijse, R. Bijkerk en P.F.M. Verdonschot, 2016. Doorstroommoerassen en moerasbeken. Typebeschrijvingen en ontwikkeling maatlaten voor de biologische kwaliteitselementen. Zoetwatersystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.
- Verdonschot, P., R. Verdonschot, J. Bouwens, B. Brugmans, A. Dees, M. Kits, M. Moeleker, J. de Hoog, M. Scheepens, I. Barten, D. Coenen, A. van Vught en S. Roovers, 2017. Kennisoverzicht kleinschalige maatregelen in Brabantse beken. Stowa, Amersfoort. Stowa-rapport 2017-16.

- 
- Waal, R.W. de, R.J. Bijlsma, R. Hessel, P.W.F.M. Hommel, J. Kros, H.T.L. Massop en G.J. Noij, 2017. Noodzaak en lokalisering van bufferstroken rond Natura 2000-gebieden in het Heuvelland. Wageningen University and Research, provincie Limburg, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren. VBNE-Rapport nr. 2017/OBN217-HE Driebergen.
- Waterschap De Dommel, 2016. Beleidsregels Ontwikkelen Waterlopen. Waterschap De Dommel, Boxtel. 9 februari 2016. Vastgesteld in DB 16 februari 2016.
- Willems, P., 2013. Waterloopmodellering. Algemene methodologie voor numerieke modellering van waterlopen. Acco, Leuven / Den Haag, 268 p.
- Willems, P., 2014. Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes. Part 1: Stepwise model structure identification and calibration approach. *Journal of Hydrology* 510, pp. 578-590.
- Wolfert H.P. 1991. Beekmeandering en natuurontwikkeling. *Landschap* 8 (4): 265-276.
- Wolfert, H.P., 2001. Geomorfological change and river rehabilitation. Case Studies on Lowland Fluvial Systems in the Netherlands. *Alterra Scientific Contributions* 6, Alterra Green World Research, 197 pp.
- Wolfs, V. en P. Willems, 2018a. Methodologie voor het karakteriseren van de afvoerdynamiek van een stroomgebied – Deel I: Methodologie. Sumaqua, Leuven.
- Wolfs, V. en P. Willems, 2018b. Methodologie voor het karakteriseren van de afvoerdynamiek van een stroomgebied – Deel II: Toepassing op de Hooge Raam. Sumaqua, Leuven.
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers en A. Bolman, 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra, Wageningen. Alterra-rapport 2387.



---

# BIJLAGEN



---

## BIJLAGE A MILIEUFACTOREN EN HET VOORKOMEN VAN SOORT(GROEP)EN

---

Het vóórkomen van aquatische organismen wordt gestuurd door een beperkt aantal milieufactoren (STOWA, 2015-W06). Met milieufactoren worden die factoren bedoeld, die direct van invloed zijn op (het functioneren van) aquatische organismen. In STOWA (2015) worden een negental factoren onderscheiden:

- Temperatuurregime: temperatuur van het water (seizoenspatronen)
- Lichtregime: hoeveelheid licht die op het water valt
- Stromingsregime: stroomsnelheid van het water en stroomsnelheidsvariatie binnen het profiel
- Substraatvariatie: aanwezigheid substraten, ruimtelijke variatie en de onderlinge verhoudingen (grind, zand, slib, hout, blad, waterplanten, oeverplanten en dergelijke)
- Organisch materiaal: beschikbaarheid van grof en fijn organisch materiaal, afkomstig van ingevallen blad of afgestorven waterplanten
- Zuurstofregime: zuurstofgehalte in het water (seizoensvariatie en dag-nacht-ritme)
- Nutriënten: nutriëntenconcentratie in het water
- Toxiciteit: aanwezigheid en giftigheid van milieuvreemde stoffen
- Continuïteit: mate waarin sediment en organisch substraat zich vrij kunnen verplaatsen in het watersysteem. In de KRW wordt de term 'riviercontinuïteit' gebruikt.

Verdonschot (2015) onderscheidt meer milieufactoren. In sessies met experts is het belang van deze factoren voor de diverse soortgroepen vastgesteld en uitgedrukt in een getal (1=sterk, 10=zwak). In onderstaande tabel zijn alle relevante milieufactoren voor langzaamstromende en snelstromende beken weergegeven, samen met het belang ervan zoals ingeschat door de experts.

**TABEL A.1 OVERZICHT VAN MILIEUFACTOREN EN WEGINGSFACTOR PER KRW ORGANISMENGROEP**

Voor de langzaamstromende (lzs) en snelstromende (ss) beken en rivieren (1=sterk, 10=zwak).

	WATERPLANTEN		MACROFAUNA		VISSSEN	
	Lzs	Ss	Lzs	Ss	Lzs	Ss
Temperatuur	5	5	1	1-5	4	3
Licht	1	1	8		1	
Droogval	3	3	1	1	1	1
Stroming	2-3	1	1-2	1-2	1	1
Connectiviteit					2	2
Substraat	2-3	1	2-3	3	1	1
Zuurgraad	3		1		5	
Macro-ionen	3					
Organisch materiaal			3-4	4		
Zuurstof			2-3	1	2	1
Voedingsstoffen	1-2	2-3				
Macrofyten			3	3	2	3

Bij de vergelijking van de twee lijsten met milieufactoren vallen een aantal dingen op:

- Sommige milieufactoren zijn voorzien van de toevoeging ‘regime’ of ‘variatie’. Hiermee wordt waarschijnlijk bedoeld dat de factoren dynamisch zijn (veranderlijk in tijd en ruimte). Dit onderscheid is echter niet onderscheidend: het geldt voor (vrijwel) alle milieufactoren.
- De milieufactor waterpeil is niet benoemd, maar wel van belang, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van oeverplanten en planten in de overstromingsvlakte. De factor droogval is wel opgenomen en kan beschouwd worden als uiterste van de milieufactor ‘waterpeil’.
- Organisch materiaal en waterplanten kunnen ook worden gezien als componenten van substraat.
- Op basis van deze overwegingen worden in deze rapportage de volgende milieufactoren aangehouden:
  - *Temperatuur* (temperatuur van het water). Vooral van belang voor de snelheid van chemische en biologische processen (afbraak, groei).



- 
- *Licht* (hoeveelheid licht die op de waterbodem valt). Vooral van belang voor de groei van waterplanten.
  - *Stroming* (stroomsnelheid van het water en stroomsnelheidsvariatie binnen het profiel).
  - *Waterdiepte/droogval* (waterhoogte ten opzichte van de waterbodemhoogte). Vooral van belang voor de ontwikkeling van oeverplanten en bij droogval voor macrofauna en vissen.
  - *Bodemsubstraat* (aanwezige substraten en de onderlinge verhoudingen: grind, zand, lutum, hout, organisch materiaal, waterplanten, oeverplanten en dergelijke).
  - *Zuurstof* (zuurstofgehalte in het water). Vooral van belang voor macrofauna en vissen.
  - *Voedingsstoffen* (nutriëntenconcentratie in water en bodem). Vooral van belang voor de groei van waterplanten.
  - *Toxiciteit* (aanwezigheid en giftigheid van milieuvreemde stoffen).
  - *Connectiviteit* (mate waarin organismen in staat zijn om een plek te bereiken).

---

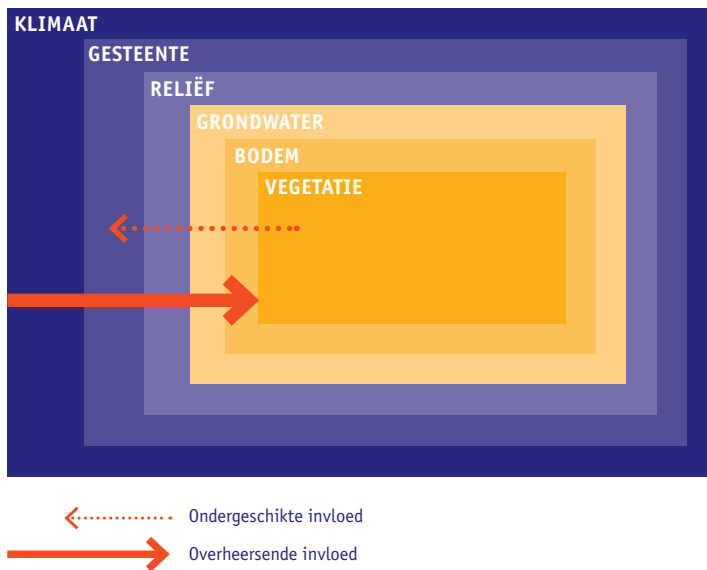
## BIJLAGE B BENODIGDE GEGEVENS HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE

---

In deze bijlage zijn de benodigde gegevens voor de analyse van de hydrologie en morfologie nader toegelicht. De gegevens zijn geordend naar de aard van de gegevens (kaartmateriaal, meetgegevens en overige informatie) en naar de beïnvloeding tussen milieucompartmenten volgens het rangordemodel van Bakker *et al.*, 1981. Deze beïnvloeding is wederzijds, maar in de regel van ongelijk belang: een factor van een hogere orde heeft meer invloed op een van lagere orde dan andersom (zie figuur B.1).

---

**FIG B.1** HIËRARCHISCHE VERHOUDING TUSSEN MILIEUCOMPARTIMENTEN VOLGENS HET RANGORDEMODEL VAN BAKKER *ET AL.* (1979)



---

### **Kaartmateriaal (shape-files van projectgebied en wijde omgeving)**

- Begrenzing/ rand projectgebied
- Topografie (woonkernen, wegen, bos- en natuurgebieden)
- Ondergrond:
  - Watervoerende pakketten (type, dikte)
  - Specifieke eigenschappen van de ondergrond, zoals breuklijnen, diepte en dikte van keileem
  - Geomorfolologische kaart
- Hoogteligging (bodemhoogte) (AHN)
- Bodemkaart (bodemtypen)
- Historische ontwikkeling
- Landgebruik (landbouw, natuur, stedelijk gebied)
- Grondwaterkaarten: GLG, GHG, isohypsen (incl. toelichting hoe deze gemaakt zijn)
- Kwelkaarten (incl. toelichting hoe deze gemaakt zijn)
- Grondwateronttrekkingen (grondwater, drinkwater), drainage (buisdrainage agrarische gebieden)
- Waterlopen
- Kunstwerken (inlaatwerken, stuwen, gemalen, duikers, bruggen, etc.)
- RWZI's, overstorten (indien beschikbaar incl. type) en andere puntbronnen (industrie)
- Ligging (of coördinaten) van meetpunten waterstanden (grond- en oppervlakte-water), debieten, biologie en waterkwaliteit

### **Meetgegevens**

- Metingen hydrologie (denk ook aan inlaatpunten en handmetingen):
  - Oppervlakewaterstanden
  - Debieten
  - Stroomsnelheden (indien beschikbaar)
  - Klepstanden
  - Grondwaterstanden (incl. boorstaten)
- Metingen morfologie:
  - Korrelgroottebepalingen/zeefkrommes bodemmateriaal (indien beschikbaar).

- 
- Veldinformatie ten tijde van biologische monsternamen (water- en oeverplanten, macrofauna, vissen):
    - Stroomsnelheid
    - Waterdiepte
    - Bodemsubstraat
    - Overige informatie
  - Hydrologie:
    - Beschikbare (gekalibreerde) hydrologische modellen (van deelgebieden) van het stroomgebied (oppervlaktewater en grondwater), incl. documentatie
    - Actuele dimensies van kunstwerken (inlaatwerk, stuwen, etc.)
  - Morfologie:
    - Actuele dwarsprofielen en bodemhoogtes
    - Historische dwarsprofielen (indien beschikbaar)
  - Onderhoud:
    - Onderhoudswijze (machine), maai-frequentie, welke oever
    - Maaitijdstippen (indien beschikbaar)
  - Beoordeling van de hydromorfologische toestand ([zie hoofdstuk 3](#))
  - Beschikbare (belangrijkste) rapporten en studies over het plangebied

---

## BIJLAGE C

### TOOLS VOOR HET OPSTELLEN VAN EEN WATERBALANS

---

De hydrologie (waterhuishouding) van een waterloop wordt bepaald door de bijdragen van de verschillende aan- en afvoerposten. Belangrijk zijn neerslag en verdamping, oppervlakkige toestroom van ondiep grondwater, aanvoer van diep grondwater, wegzijging en de inlaat en aflaat van oppervlaktewater. Kennis van de hydrologie is van belang omdat dit inzicht geeft in veel factoren die van belang zijn voor de ecologie. Voorbeelden daarvan zijn de stroomsnelheid, het waterpeil en fluctuaties daarin. Tevens vormt de waterbalans de basis voor de stoffenbalans: de aan- en afvoer van water en de kwaliteit daarvan vormen belangrijke posten op de stoffenbalans.

Het bepalen van de bijdrage van de verschillende posten is vaak lastig vanwege het ontbreken van goede gegevens over grondwaterstroming of aan- en afvoer van oppervlaktewater. Grondwatermodellen kunnen hier meer inzicht in verschaffen, maar worden soms als te grof ervaren om deze stromingen goed in beeld te brengen. Bovendien laat de kalibratie van grondwatermodellen soms nog te wensen over. Goede kennis van de grondwaterstanden in de omgeving en de samenstelling van de ondergrond is echter een vereiste. De aanwezigheid van scheidende lagen en de heterogeniteit daarin maakt de hydrologie van beekdalen complex.

Water- en stoffenbalansen moeten bij voorkeur op dagbasis worden opgesteld. De reden hiervoor is dat dagelijkse variaties in neerslag en verdamping leiden tot peilveranderingen, die vaak worden gecompenseerd door inlaat of aflaat van water. Inlaat en aflaat kunnen elkaar op korte tijd (enkele dagen) afwisselen; om deze posten goed in te schatten is het dus nodig een balans op dagbasis te maken.

Een hydrologisch model heeft als doel om de natuurlijke neerslagafstroming te kunnen simuleren (voor gegeven neerslagreeksen). Tijdens het kalibratieproces worden inzichten verworven over de dynamica van het stroomgebied, zoals bijvoorbeeld de fracties van de verschillende deelstromen, de snelheid van afstroming en informatie over de afstromingsfracties van de drie deelstromen in functie van de verzadigingsgraad (Wolfs en Willems, 2018b).

---

### Rekentool waterbalansen (STOWA, 2015-17)

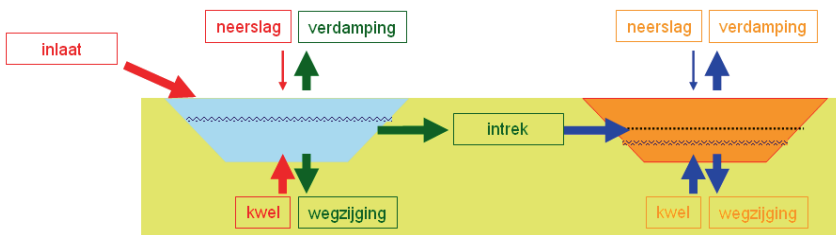
De ASWA-kerngroep Waterkwaliteit van STOWA heeft samen met Waternet, Witteveen+Bos en IntoLearning een speciale e-learning module ontwikkeld voor het opstellen van een waterbalans: 'Waterstromen in beeld'. Ook is er een bijbehorende rekentool ontwikkeld waarmee waterbeheerders daadwerkelijk waterbalansen kunnen opstellen, zie [http://stowa.nl/projecten/E-earning\\_module\\_\\_rekentool\\_voor\\_opstellen\\_waterbalans\\_](http://stowa.nl/projecten/E-earning_module__rekentool_voor_opstellen_waterbalans_)

De waterbalans in Excel geeft met een relatief eenvoudige benadering van de hydrologie een goede indruk van de water- en stofstromen, zoals nutriënten en chloride. Met minimale data kan al een waterbalans worden opgesteld. Neerslag en verdamping vormen belangrijke invoer. Kwel en infiltratie kan in eerste instantie op nul worden gezet, maar kunnen later worden ingeschat of afgeleid op basis van beschikbare informatie (bijv. kwel/infiltratiekaarten).

Elk balansgebied is onderverdeeld in twee bakjes: 1) open water en 2) percelen, zie [figuur C.1](#). Het watertekort- en overschot in de percelen wordt bepaald in het bakje 'percelen' op basis van kwel en wegzijging enerzijds en neerslag en verdamping anderzijds. Als het peil in het bakje boven het evenwichtspeil (gelijk aan streefpeil) uitkomt gaat er water van de percelen naar het open water via drainage/uitspoeling. Andersom gaat er water van het open water naar de percelen door intrek als het peil in het bakje onder het evenwichtspeil uitkomt. Het peil in het bakje 'percelen' wordt dus berekend onafhankelijk van het peil in het open water.

---

**FIG C.1 SCHEMATISATIE AANVOER- EN AFVOERSITUATIE VOOR BALANSGEBIEDEN**



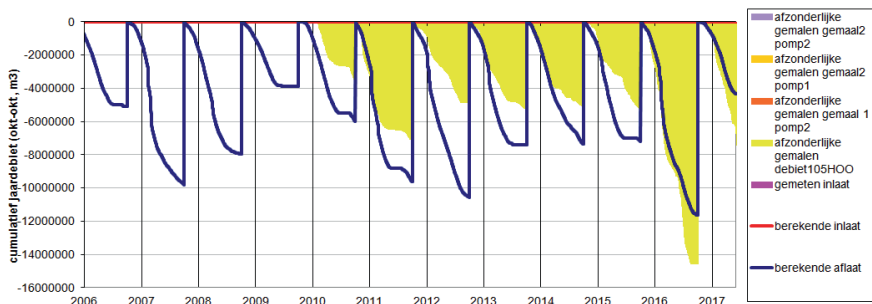


Het watertekort- en overschot in het watersysteem wordt bepaald in het bakje open water op basis van 1) kwel en wegzijging, 2) neerslag en verdamping en 3) drainage en intrek. Als het peil in het bakje open water boven het streefpeil + marge uitkomt wordt er water afgevoerd. Andersom wordt er water aangevoerd als het peil in het bakje onder het streefpeil + marge uitkomt. In [figuur C.1](#) is dit geschematiseerd in een aanvoersituatie (droge zomer) en een afvoersituatie (natte winter).

Controle van de waterbalans vindt plaats aan de hand van beschikbare meetwaarden. Dat kan zijn: peilverloop, gemeten inlaat en afvoer, [zie figuur C.2](#). Daarnaast is het ook mogelijk om een conservatieve stoffenbalans bij te houden. Op basis van aan bronnen toegekende chlorideconcentraties wordt een chlorideconcentratie berekend, welke kan worden vergeleken met gemeten chlorideconcentraties. Balanstermen kunnen worden aangescherpt door in te zoomen op specifieke perioden waarin bepaalde balanstermen dominant zijn (bijvoorbeeld kwel in lange droge perioden).

**FIG C.2 CUMULATIEVE AFVOER VOOR DE HOOGE RAAM**

*De gemeten afvoer is systematisch lager dan berekend in de jaren 2010 /m 2015. Vanaf 2016 geldt juist het omgekeerde. (geel = gemeten, blauw = berekend)*

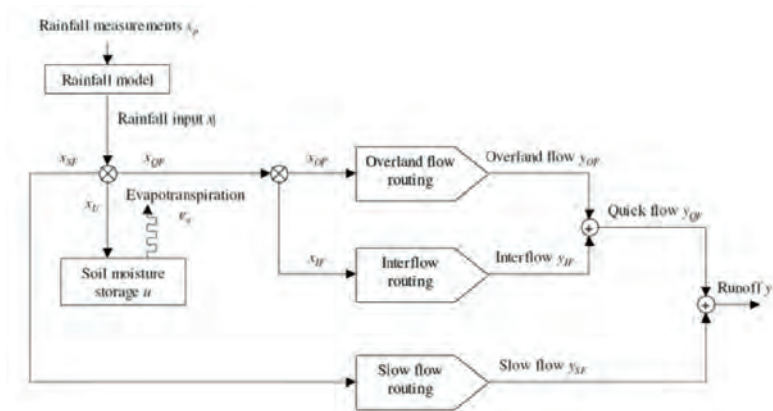


### VHM (Willems, 2014)

Het VHM model start van een veralgemeende modelstructuur met bergingselementen die de (1) grondwaterberging (bodemverzadiging), (2) de oppervlakte berging en (3) de berging in de onverzadigde zone voorstellen. Deze verschillende ber-

gingselementen worden gevoed door neerslag, die vervolgens getransformeerd worden in deelstromen via (lineaire) reservoir modellen. De structuuridentificatie en -kalibratie van deze deelmodellen en structuren wordt uitgevoerd door het kijken aan tijdreeksen. De verschillende submodellen worden geïdentificeerd en gekalibreerd aan de hand van minimaal 12 modelparameters.

**FIG C.3** STRUCTUUR VAN HET VHM MODEL (WILLEMS, 2014)



Het hydrologisch model wordt stapsgewijs opgebouwd, daarbij gebruik makend van de WETSPRO en VHMbuild tool (Wolfs en Willems, 2018b). Beide tools zijn in Excel geprogrammeerd en vrij beschikbaar op <https://www.kuleuven.be/hydr/pwtools.htm>. Op deze website zijn eveneens instructievideo's terug te vinden die het gebruik van beide tools illustreren.

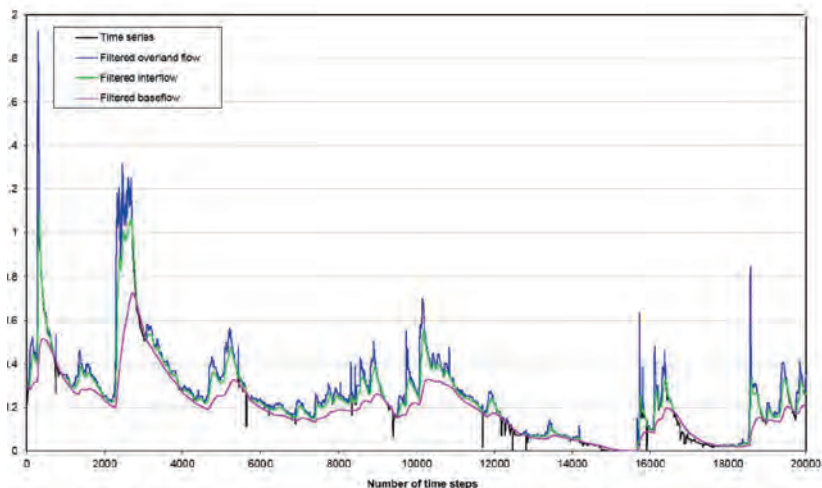
Een WETSPRO analyse heeft als doel om meer inzicht te verkrijgen in de afvoerdynamiek van een stroomgebied, en vormt zo de basis voor de verdere hydrologische modellering. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de VHM tool (Willems, 2014). Dit is een Excel rekenblad dat gebruikt wordt om het hydrologisch VHM model te kalibreren en te simuleren.

De VHM tool bouwt rechtstreeks verder op de resultaten van WETSPRO. Voor een nadere toelichting op het gebruik van Wetspro en VHM zie Wolfs en Willems (2018).

---

**FIG C.4 HYDROLOGISCHE ANALYSE MET AFVOERCOMPONENTEN VOOR DE HOOGE RAAM**

Uit de analyse blijkt dat de baseflow de belangrijkste component is van de totale neerslagafstroming (Wolfs en Willems, 2018b).



---

**Walrus (Brauer *et al.*, 2014 en 2015)**

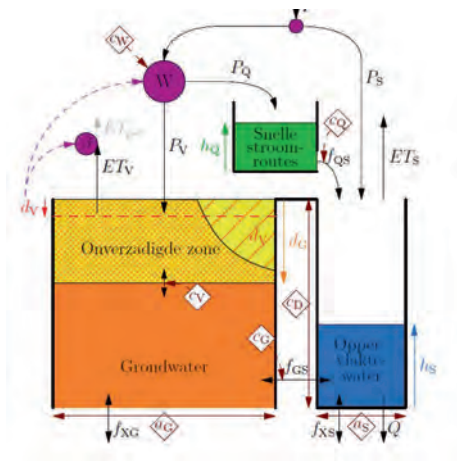
WALRUS is een nieuw, snel, ruimtelijk geïntegreerd neerslag-afvoermodel voor laaglandstroomgebieden. Het is ontwikkeld tijdens een promotieonderzoek bij de leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer van Wageningen Universiteit. Later is WALRUS gebruiksvriendelijk gemaakt en de functionaliteit uitgebreid om het model geschikt te maken voor operationeel gebruik binnen het Nederlandse waterbeheer. Homepage Walrus: <https://github.com/ClaudiaBrauer/WALRUS>

WALRUS simuleert in principe hoeveel water het oppervlaktewaterstelsel bereikt. WALRUS kan gebruikt worden als invoer voor het hydraulische model SOBEK. Het toevoegen van WALRUS aan de opties voor de neerslag-afvoercomponent in SOBEK (SOBEK-RR) is waarschijnlijk mogelijk.

WALRUS houdt expliciet rekening met hydrologische processen die belangrijk zijn in laaglandgebieden, in het bijzonder (1) de koppeling tussen grondwater en onverzadigde zone, (2) vochttoestandafhankelijke stroomroutes, (3) grondwater-oppervlaktewaterterugkoppeling en (4) kwel, wegzijging en het inlaten of wegpompen van oppervlaktewater.

WALRUS bestaat uit een gekoppeld reservoir voor grondwater en onverzadigde zone, een reservoir voor snelle stroomroutes en een oppervlaktewaterreservoir, zie [figuur C.5](#). Regenwater ( $P$ ) wordt verdeeld over de verschillende reservoirs: een vaste fractie gaat naar het oppervlaktereservoir ( $P_S$ ) en de natheidsindex ( $W$ ) bepaalt welke fractie van de overige neerslag langzaam door de bodemmatrix percoleert ( $P_V$ ) en welke fractie naar het oppervlaktewater stroomt via snelle stroomroutes ( $P_Q$ ).

**FIG C.5 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE MODELSTRUCTUUR VAN WALRUS MET RESERVOIRS EN FLUXEN ZOALS GEPRESENTEERD IN BRAUER ET AL. (2014)**

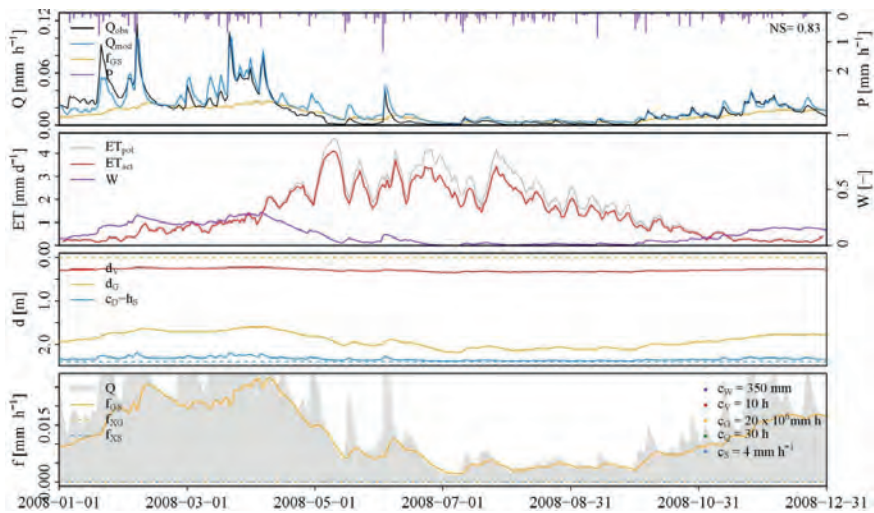


WALRUS is geschikt voor operationele toepassingen omdat het efficiënt rekent en numeriek stabiel is. In de vrij toegankelijke modelcode zijn standaardrelaties geïmplementeerd, zodat er slechts vier parameters overblijven die gekalibreerd hoeven te worden. Het model is geschikt voor het operationeel simuleren van hoogwater en droogte ten behoeve van risico-analyses en scenario-analyses, voor het ontwerpen van infrastructuur en voor het aanvullen van ontbrekende gegevens in afvoermeetreeksen.

Een voorbeeld van de modeluitvoer van het stroomgebied van de Hooge Raam is weergegeven in [figuur C.6](#). Het bovenste paneel toont de neerslag ( $P$ ) en gemeten ( $Q_{obs}$ ) en gemodelleerde afvoer ( $Q_{mod}$ ). In het tweede paneel staat de natheidsindex ( $W$ ), die aangeeft welke fractie van de neerslag naar het reservoir voor snelle stro-

omroutes wordt geleid en een duidelijke seizoensgang vertoont. Het derde paneel toont het verloop van bergingsdeficiet ( $d_v$ ), grondwaterdiepte ( $d_G$ ) en oppervlaktewaterpeil ( $h_s$ ) en hun afstand tot de beekbodem ( $c_b$ ) en maaiveld. Paneel 4 toont de grondwaterdrainage ( $f_{CS}$ ).

**FIG C.6 MODELRESULTAAT WALRUS VOOR DE HOOGTE RAAM IN 2008**



---

## BIJLAGE D RESULTAAT INTERVIEWS

---

Bij de inventarisatie van kennis, tools en hulpmiddelen voor de analyse van de hydrologie en morfologie van stromende wateren (zie § 8.2) zijn de volgende personen geïnterviewd: Gilbert Maas (GM; Alterra), Ton Hoitink (TH; WUR), Erik Mosselman (EM; Deltares), Patrick Willems en Erik Toorman (PW, ET; Universiteit van Leuven), Petra Dankers (PD; RHDHV), Joris Eekhout (JE; CSIC, Spanje) en Jasper Candel (JC; WUR).

### Afvoerdynamiek

Onder afvoerdynamiek wordt verstaan de mate waarin de afvoer varieert in tijd en plaats (GM, PW, JE, JC).

#### *Meten*

Voor het meten/ bepalen van de afvoer(dynamiek) zijn de volgende methoden genoemd:

- Bepalen van de afvoer op basis van de waterstand via m.b.v. 'rating-curves': de relatie tussen waterstand en afvoer (Q-h relaties). Deze werken in Nederland helaas niet goed, vanwege het geringe verhang (TH).
- Akoestische metingen (met horizontale ADCP) (TH, PW).
- Ultra-hoogfrequente radars. Hiermee kunnen oppervlaktestromingsvelden worden gemeten (TH).
- Meten van de (afname van de) zoutconcentratie na het toedienen van een hoge dosis zout (éénmalig) op een bovenstrooms gelegen punt. Deze 'zouttest' geeft inzicht in de turbulentie en de ruwheid van de waterloop (JC).
- Reconstructie van de historische geulvullende afvoer (bankfull discharge) door te boren langs oude rest-meanders (JC).

#### *Opmerkingen*

- Het meten van de afvoerdynamiek is nog niet zo eenvoudig, met name door meet-onnauwkeurigheden (JC). Bij het bepalen van de afvoer uit peilmetingen worden veel fouten gemaakt. Waterstanden zijn wat dat betreft een stuk nauwkeuriger (TH, PW).



- 
- De debietmetingen (op basis van peilen bij stuwen) moeten worden aangevuld met peilmetingen buiten het invloedsgebied van de stuw (PW).

### *Analyseren*

Voor het analyseren van de afvoer(dynamiek) zijn de volgende methoden genoemd:

- Het onderscheiden van verschillende ritmes in de afvoer: de veranderingen door het jaar heen, per seizoen of per dag. Er is sprake van verschillende ritmes en periodes. Een goede eerste stap in de analyse is het berekenen van de gemiddelde, minimum, maximum, etc. afvoer per maand op basis van een meerjarige meetreeks. De resultaten kunnen worden samengevoegd in één diagram, een seizoensplot. Op deze manier ontstaat een goed beeld van de gemiddelde afvoer en de variatie van de afvoer per maand en door het jaar heen (TH).
- Daarnaast is het van belang om de afvoer te ontleden in verschillende componenten. Goede methoden hiervoor zijn de 'wavelet-analyse' en de 'spectraal-analyse'. Deze ontleedt de variatie in de gemeten afvoeren in perioden, zodat seizoensinvloeden en pulsen van de neerslag kunnen worden herkend en geanalyseerd. Er wordt ook vaak een koppeling gemaakt met neerslag-afvoermodellen (TH, PW).
- De 'ruimtelijke disaggregatie methode': hiermee kan de afvoer van deelgebieden worden herleid op basis van een afvoermeting op een bepaald punt, de hydraulische kenmerken van het waterlopenstelsel en diverse gebiedskenmerken (PW).
- Het kalibreren en valideren van modellen aan de hand van meetreeksen. Dit kan je veel leren over de afvoerdynamiek in een stroomgebied (JE, PD).
- Bepalen van de basisafvoer (i.r.t. grondwaterstanden) en piekafvoeren (GM, PW).
- Een methode om de afvoervariatie te bepalen is de 'annual coefficient of flow variation' (Poff en Ward, 1989). Deze coëfficiënt wordt bepaald door de standaard deviatie van de afvoer te delen door de gemiddelde jaarlijkse afvoer. Een afvoervariatie van 30 is een gedempte dynamiek die mag worden verwacht van meer natuurlijke situaties (JE).
- Bepalen van de geulvullende afvoer (bankfull discharge) volgens de regels van het handboek geomorfologisch beekherstel (GM). De 'bankfull discharge' is een belangrijke maat voor morfologische processen.

---

### Opmerkingen:

- Om de resultaten goed te kunnen interpreteren en begrijpen, is het nodig om ook de ondergrond te kennen, het bodemtype, de interactie met het grondwater, etc., een systeemanalyse dus (TH).
- Verder zijn verschillende aspecten van neerslag-afvoer relaties van belang, zoals de ruimtelijke verdeling van de neerslag en de variatie in het bodemvocht onder invloed van neerslag en verdamping (TH).
- De afvoerdynamiek is de resultante van de vele processen bovenstrooms in het stroomgebied. Het is moeilijk op basis van alleen een reeks afvoermetingen de oorzaken van bepaalde patronen en trends te achterhalen (PW).
- Er zijn hele boekplanken geschreven over afvoerdynamiek, stroomsnelheden en turbulentie. Kort beschouwd kent men de processen nog niet goed genoeg. Er worden ook vaak teveel aannamen gemaakt die niet kritisch worden beschouwd (PW). Er zijn heel veel parameters en de natuurlijke variaties zijn heel groot (EM).
- Voor de ecologie zijn de stroomsnelheid en de stroomsnelheidsdynamiek van veel groter belang dan de afvoer. In ondiepe systemen is daarnaast de stromingsvariatie in de ruimte (binnen het dwarsprofiel) erg belangrijk; in hydrologische zin is hier echter nog weinig over bekend. Met name de stromingsdynamiek en de stroomsnelheidsvariatie zijn moeilijk te vatten (TH).
- Overigens is de ADCP zeer geschikt om meer zicht te krijgen op de stromingsvariatie in het dwarsprofiel (TH, PW).

### Morfodynamiek

De betekenis van het begrip 'morfodynamiek' volgens de geïnterviewden is als volgt:

- De veranderingen in de bodemligging als gevolg van verschillen/ gradiënten in sedimenttransport. In theorie is een systeem in evenwicht als de hoeveelheid sediment die een systeem inkomt gelijk is aan de hoeveelheid sediment die het systeem verlaat (geen gradiënt in sedimenttransport) (TH).
- De veranderingen in de morfologie (GM).
- De mate van temporele en ruimtelijke variatie in de morfologie (ET).
- Sedimenttransport en veranderingen in de bodemligging en beddingstructuren (EM).
- De ruimtelijke en temporele veranderingen in de morfologie (JC).

---

### *Meten*

Voor het meten/ bepalen van de morfodynamiek zijn de volgende methoden genoemd:

- ADCP en Multibeam (veranderingen in de bodemligging) (TH, PW, EM, JE, JC).
- GPS-metingen in raai/ grid (veranderingen in de bodemligging) (JE).
- Drone (veranderingen in de bodemligging) (TH). Drones werken niet in de kleine veelal begroeide beken (JE).
- Beschrijven van (de veranderingen in) de waargenomen structuren, vormen en patronen zoals bankvorming, oevererosie, afzettingen op de oevers en oeverwalvorming, stroomribbels en diepe delen ('pools'), substraten, breedte en diepte van de geul. Deze geven inzicht in de morfodynamiek op grote schaal (macro en meso) (GM, EM, JC). Veranderingen op langere termijn kunnen worden vastgesteld/ gemeten door middel van luchtfotoanalyses vanaf 1939, historische kaarten, grondboringen en grondradar (JC).
- Ophoping van sediment in een zandvang (verandering van de bodemligging) (JC).
- Daarnaast is monstername van de korrelgrootte van het substraat nodig (schatting van de D50 uit grondboringen, volledige zeefanalyse of gebruik van een Laser Particle Sizer) (GM, EM, JC). Als het vooral om zwevend transport gaat, zijn de hoeveelheden bodemtransport te verwaarlozen en dan is monstername van de bodem niet noodzakelijk (EM).
- Metingen van sedimenttransport zijn onnauwkeurig en ook niet representatief want het zijn altijd maar korte perioden (EM).
- Het meten van suspensietransport is eenvoudiger (ET).
- De parameters voor slibtransport zijn wel meetbaar, sommige wat eenvoudiger dan andere. Gedacht moet dan worden aan: valsnelheidsmetingen, vloggroottemetingen en
- vloksnelheden. De dynamiek en de variatie in de parameters in de tijd, maken het erg moeilijk om goede metingen te verkrijgen.

### *Opmerkingen*

- Een grote uitdaging is steeds om in te schatten waar het sediment vandaan komt en welke samenstelling dit heeft. In Nederland wordt veel te weinig gemeten (JE).
- Het meten van de waterstanden is het makkelijkste en het meest nauwkeurig. Metingen van de afvoer zijn al een stuk minder nauwkeurig, evenals de bere-

---

kende afvoeren op basis van (gemeten) waterstanden. Dit geldt nog sterker voor het sedimenttransport: deze is maar zeer lastig te voorspellen en te berekenen. Het resultaat geeft veelal slechts een orde-grootte. Daarom wordt de morfologie vaak bestudeerd als uitingsvorm/ resultaat van het sedimenttransport (TH, EM, PD).

### *Analyseren*

- Voor het analyseren van de morfodynamiek zijn de volgende methoden genoemd:
- Weergeven van veranderingen in de bodemligging in de tijd (TH, JE).
- Instrumenten voor de morfologische analyse van beken en rivieren uit het handboek geomorfologisch beekherstel, zoals formules voor natuurlijke beddingvormen (PD) en diagrammen voor geultypen, beddingvormen en banktypen (GM). Hier is wel de nodige discussie over: EM raadt gebruik van het Hjulström diagram af, het Shields-diagram is beter en algemeen toepasbaar; volgens JE missen de stabiliteitsdiagrammen de onderbouwing, de toetsing en validatie; volgens JC werkt het stabiliteitsdiagram nog niet goed voor de overgang van lateraal stabiel naar meandering, omdat het alleen de minimale energie geeft die nodig is om meandering te krijgen. Oeverstabiliteit zit er niet in, en juist dat is een belangrijke factor in beken. Kortom het is nog een leuke uitdaging om nog verbeteringen aan te brengen; JC past de hydraulische geometrierelaties voor bedding en meanderdimensies op basis van de afvoer zelden toe, daarvoor is de spreiding te groot. Je zou ze in principe voor elke beek afzonderlijk moeten bepalen om ze zinvol te kunnen gebruiken (JC).
- Berekening van de b/d-ratio (JE, JC, PD).
- Een vuistregel voor de aard van het sedimenttransport, ofwel het onderscheid tussen gesuspendeerd (zwevend) en bodemtransport, is  $u^*/W$ , de verhouding tussen de schuifspanningssnelheid en de valsnelheid van sediment. Als  $u^*/W$  heel groot is, dus als de schuifspanningssnelheid veel groter is dan de valsnelheid dan treedt vooral zwevend transport op. En als  $u^*/W$  kleiner is, dan is het bodemtransport dominant. De  $u^*$  zegt ook iets over turbulentie en is een maat voor de opwaartse kracht door wervels die op de deeltjes werkt. Als die groot is zal veel sediment in suspensie zijn (EM).
- Gebruik van sedimenttransportformules, zoals Engelund-Hansen voor zandig materiaal (ET, EM, JE, JC) en Meyer-Peter-Müller voor grof materiaal zoals grind (EM). Op basis van de (berekende) afvoer en korrelgrootte wordt het sediment-

---

transport berekend (ET, EM, JE, JC). Sedimenttransportformules en modellen om sedimenttransporten te berekenen zijn behoorlijk betrouwbaar. Het kan een factor 2 verschillen en dat is behoorlijk nauwkeurig (EM).

- Voor het beschrijven van het slibtransport wordt gewerkt met valsnelheden, erosiebestendigheid, kritische schuifspanningen en welke getallen daarvoor moeten worden gehanteerd. Voor slib is er eigenlijk alleen de formule van Parteniades/Krone. Voor de waarden die daarvoor moeten worden gebruikt moet je goed gevoel hebben. Dat hangt af van de lokale omstandigheden en dat is lastiger te bepalen dan bij zand. Voor de valsnelheid, vloggrootte en vloksnelheden zijn er behoorlijk wat data uit de hele wereld beschikbaar waardoor je gevoel kunt krijgen voor wat hoog en wat laag is en de marges die je onder de gegeven omstandigheden moet hanteren. Bij Deltares wordt gewerkt met 3 vloggrootten met verschillende valsnelheden, die dan worden gekalibreerd. Vaak leveren daarmee de modellen de juiste uitkomsten zonder dat de absolute waarden kloppen (PD).
- Het uitvoeren van een temporele berekening van sedimenttransport met afvoerdata als input. Dat je een tijdserie van de afvoer vertaalt naar een tijdserie van stroomsnelheden en sedimenttransporten. Ruimtelijk zou misschien ook wel mogelijk zijn, maar dat vergt meer ontwikkeling (JE, JC).
- Wellicht zijn referentiewaarden voor laaglandbeken te genereren door middel van modelberekeningen. Ook kunnen referenties uit Polen nuttig zijn. De onderzoeksresultaten van een meetcampagne moeten nog worden uitgewerkt. Deze dataset is nog niet vrijgekomen en nog niet gepubliceerd. Het plan is dit te doen in een artikel samen met Piet Verdonschot (JE).
- Geavanceerde morfologische modellen, zoals Delft2D en Delft3D (EM, PD) en FENST2D, SISYPHE (2D), TELEMAC (3D), TOMAWAC (3D) en OpenFOAM (ET), vooral toegepast in grote rivieren, estuaria en kustgebieden, lang niet alles daarvan is ook toepasbaar in beken.
- Hydrologisch model gekoppeld aan bodemerosiemodel voor sedimentaanvoer (JE).

#### *Opmerkingen*

- Bij veel ecologische projecten wordt te krap gekeken naar uitsluitend richtlijnen die bijvoorbeeld betrekking hebben op de stroomsnelheid en niet naar de morfologische implicaties ervan (PD).

- 
- De formules uit het handboek geomorfologisch beekherstel zijn beschikbaar in een spreadsheet die ook op de website van STOWA staat. In de spreadsheet zijn ook veel voorkomende invoervariabelen opgenomen (constanten, ruwheden, dichtheid van sediment, etc.). Het zou goed zijn om de gevoeligheid van deze formules voor de invoervariabelen nader te onderzoeken (GM).
  - Sedimenttransportformules zijn misschien wel de beste vuistregels. Gradiënten in sedimenttransportcapaciteit bepalen uiteindelijk of sedimentatie of erosie optreedt (EM).
  - Bij hele lage stroomsnelheden is er vrijwel geen bodemtransport van zand en grind en is vooral het slibtransport van belang. Dit slibtransport is vooral afhankelijk van wat er bovenstrooms in komt, dus de sedimentlast. De hoeveelheid fijn sediment er in de rivier stroomt, hangt af van hoeveel fijn sediment er in het stroomgebied beschikbaar is voor transport. De toevoer of de sedimentproductie hangt niet af van de afvoer in de waterloop. Er is hooguit een vage correlatie (EM).
  - Als je met modellen aan de gang gaat, kies je daarom in feite altijd voor een bepaald transportconcept. Als het gaat om grind en zand en sorteringseffecten dan kijk je niet meer naar het zwevend transport. Omgekeerd werk je als je kiest voor een concept voor zwevend transport niet met grof sediment en bodemtransport (EM, PD).
  - Er nog weinig praktisch toepasbare kennis over het in beweging komen van cohesieve sedimenten (klei, slib). Belangrijke aandachtspunten zijn onder andere: is het klei of niet? Wat is de hoeveelheid lutum? Hoe hard is het ( $N/m^2$ )? Het betreft veelal de grondmechanische eigenschappen van het sediment. Er zijn maar weinig deskundigen die weten hoe ze met klei en grondmechanische eigenschappen om moeten gaan en welke waarden moeten worden gehanteerd voor bepaalde parameters. Er is wel kennis aanwezig, maar deze is nog heel wetenschappelijk en weinig praktisch toepasbaar (PD).
  - Suspensietransport heeft een groot aandeel in het transport van zwevende en organische stof en de daaraan geadsorbeerde verontreinigingen, zoals nutriënten, BZV. In FENST2D is een model ontwikkeld voor dit suspensietransport (ET).
  - In de meeste Nederlandse beken heeft geen natuurlijke actieve meandering plaatsgevonden. In vrijwel alle bekende situaties was de oorzaak aantoonbaar gelegen in menselijke verstoring. Als je heel dynamische rivieren hebt, dan moet je echt rekening houden met de processen, maar als het laagdynamische/ laag-energetische rivieren of beken betreft dan word je niet afgestraft door de



---

natuurlijke processen (naar Herve Piegay: EM, JE, JC). Met weinig moeite kan eventuele erosie en migratie worden beperkt (JE).

- Er is (te) veel aandacht voor de vormen van meanders en (te) weinig voor de processen, het transport van sediment en slib. Daar wordt weinig naar gekeken/ gevraagd. Waarschijnlijk hebben veel beekherstelprojecten na circa 5 jaar te maken gehad met verlanding of aanslibbing (PD).
- De morfologische veranderingen vinden plaats op kleinere schaal. Daarnaast is het effect van de ontwikkeling van de vegetatie groot (JE).
- Er zijn voor zover bekend geen tools om iets te zeggen over de morfologie binnen de bedding op het niveau van het habitat. We weten inmiddels wel kwalitatief te beschrijven wat er in een bedding kan gebeuren maar we zijn nog heel ver af van het kwantificeren van de processen op dit niveau. Zeker als een koppeling gewenst is met organismen wordt het een zeer subtiel spel dat van veel factoren afhankelijk is zoals de substraten zelf (EM, JE).

## **Vegetatie en ruwheden**

### *Meten*

Voor het meten/ bepalen van de vegetatie (ruwheden) zijn de volgende methoden genoemd:

- Uiterwaarden: ruwheden van uiterwaardbegroeiingen (RIZA-rapporten) (TH).
- Afleiden van weerstands-waarden op basis van metingen in het veld (validatie) (TH).
- Luchtfoto's, al dan niet met NVDI vegetatie-index waarmee de groenheid van vegetatie kan worden uitgerekend. Dit betrof niet de vegetatie in de beek zelf en ook niet van de verticale dichtheid. Dit blijft dus wel een aandachtspunt (JE).
- Vegetatieopname i.c.m. landmeetapparatuur. Helaas is dit nog niet gecombineerd met opnames van de vegetatiedichtheid in de diepte (JE).

### *Opmerkingen*

- Belangrijk is dat de weerstand door de vegetatie afhankelijk is van de afvoer (bij hoge afvoeren neemt de weerstand af) en dat de weerstand varieert over het seizoen. Dit zit nog niet goed in modellen en labonderzoeken zijn nog niet in het veld gevalideerd (TH).
- Uit experimenten met opstuwing door dood hout (ruwheden) van Tjitske Geertsema (River Care) blijkt dat er in het eerste jaar opstuwing is, maar dat die snel

---

verdwijnt als gevolg van de aanpassing van de bodem, door erosie. Wel is gebleken dat veel afhangt van de manier van aanleggen. Zij heeft hier ook een modelletje van gemaakt (JC).

## **Beschouwing en conclusies**

### *Afvoerdynamiek*

Het bepalen (meten) van de afvoer(dynamiek) blijkt lastig en in de praktijk worden hierbij al snel (grote) fouten gemaakt. Metingen met een ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, akoestische doppler stroomsnelheids meter) zijn het meest nauwkeurig en zijn bovendien ook bruikbaar voor het meten van de bodemhoogte en variatie van stroomsnelheden in het doorstroomprofiel.

De analyse van de afvoer(dynamiek) dient altijd te starten met een zorgvuldige bestudering van de beschikbare meetreeksen en validatie aan de hand van gebiedskenmerken (bodemenkenmerken, waterlopenstelsel, meetreeksen van het grondwater), neerslag-afvoerpatronen en dergelijke. Het gebruik van modellen draagt goed bij aan deze validatie, net als de beschikking van waterstandsmeetpunten buiten de invloedssfeer van stuwen. Voor de afvoervariatie is de 'annual coefficient of flow variation' mogelijk een geschikte maat (Poff en Ward, 1989).

### *Morfodynamiek*

Het meten van de morfologie en zeker de morfodynamiek staat eigenlijk nog in de kinderschoenen. In principe geschiedt dat vrijwel alleen in grote rivieren en estuaria, waar een vaargeul moet worden gehandhaafd. De meest toegepaste methode voor het meten/ bepalen van de morfodynamiek is het meten van veranderingen in de bodemligging, m.b.v. ADCP, Multibeam en GPS. Het meten van het sedimenttransport zelf is lastig en levert grote foutmarges. Voor een goede analyse van de morfodynamiek is informatie over de korrelgrootte van het substraat noodzakelijk. Bovendien is een koppeling met een meting van de afvoerdynamiek benodigd om de invloed van de individuele afvoergolven te bepalen.

Voor het verklaren van de gesignaleerde morfologische veranderingen is het gebruik van sedimenttransportformules het meest geschikt. De verhouding tussen de schuifspanningssnelheid en de valsnelheid van sediment ( $u^*/W$ ) geeft aan of er vooral sprake is van bodemtransport of van zwevend transport. Voor het bodemtransport van zandig materiaal wordt de formule van Engelund-Hansen

---

algemeen toegepast. Op basis van de (berekende) afvoer en korrelgrootte wordt het sedimenttransport berekend. Zwevend transport is vooral afhankelijk van wat er bovenstrooms in komt, dus de sedimentlast. Er is nog geen eenduidige methode om het zwevend transport te beschrijven (er zijn wel diverse voorbeelden beschikbaar).

Ook de formules en diagrammen uit het handboek geomorfologisch beekherstel bieden een houvast, hoewel er wel diverse vragen zijn over de toepasbaarheid voor de Nederlandse situatie en de grote spreiding van de uitkomsten.

Voor de ecologische kwaliteit zijn primair de processen die zich afspelen op het niveau van een habitat relevant. De ecologisch relevante morfodynamiek is de dynamiek van het beddingmateriaal als gevolg van continue fluctuaties in de stroming en het sediment. Er is echter nog erg weinig kennis van de relaties tussen de morfodynamiek en de ecologische potenties. We weten inmiddels wel kwalitatief te beschrijven wat er in een bedding kan gebeuren maar het kwantificeren van de processen op dit niveau blijft een grote uitdaging ([zie aanbevelingen](#)).

#### *Vegetatieontwikkeling (ruwheden)*

Met betrekking tot de vegetatie en ruwheden is weinig informatie beschikbaar gekomen. Er is in ieder geval een grote variatie in ruwheden als gevolg van verschillende soorten, verloop van het groeiseizoen, onderhoud, afvoeren en dergelijke. Mogelijk kan hier op basis van de uitwerking 'bufferzone en waterplanten' iets over gezegd worden ([STOWA, 2018-28](#)).



---

## STOWA IN HET KORT

---

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert

toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' - de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft - om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede van alle waterschappen.

---

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.



### **STOWA**

Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

### **Bezoekadres**

Stationsplein 89, vierde etage  
3818 LE Amersfoort

t. 033 460 32 00  
e. [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl)  
i. [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)



---

## COLOFON

---

Amersfoort, December 2018

### **Uitgave**

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

### **Auteurs**

Bart Reeze (Bart Reeze Water & Ecologie), Roy Laseroms (LWRO).

### **Begeleidingscommissie**

Marco Beers (waterschap Brabantse Delta), Marieke Ohm (Rijkswaterstaat WVL), Ineke Barten (waterschap De Dommel), John Lenssen (waterschap Rijn en IJssel), Peter Paul Schollema (waterschap Hunze en Aa's), Ronald Gylstra (waterschap Rivierenland), Gertie Schmidt (waterschap Vechtstromen), Rob Fraaije (waterschap Aa en Maas), Auke de Ridder (waterschap Drents Overijsselse Delta), Steven Verbeek (STOWA), Bas van der Wal (STOWA).

### **Referaat**

De ecologische sleutelfactoren vormen een denkkader voor het uitvoeren van een ecologische watersysteemanalyse. Ze geven inzicht in het ecologisch functioneren van een watersysteem. Deze kennis is cruciaal voor het bepalen van realistische waterkwaliteitsdoelen en het vaststellen van effectieve maatregelen. Dit rapport geeft een toelichting op de uitwerking van de Ecologische Sleutelfactor hydrologie en morfologie in stromende wateren.

### **Trefwoorden**

Hydrologie, morfologie, biodiversiteit, ecologische sleutelfactoren, stilstaande wateren, stromende wateren, watersysteemanalyse, waterkwaliteitsdoelen, waterkwaliteit, maatregelen, hydrologische omstandigheden, hydromorfologie, sedimenttransport

---

**Vormgeving** Vormgeving Studio B | Nieuwkoop

**Fotografie** iStock, Nationale Beeldbank, Bart Reeze, Roy Laseroms.

Kaarten: Peter Veldt | Landschapontwerper

**Druk** DPP | Houten

**STOWA** 2018-57

**ISBN** 978.90.5773.817.3

### **Copyright**

De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

### **Disclaimer**

Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijd kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

stowa

STICHTING  
TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER

[stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl) [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE AMERSFOORT

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

