

**stowa**

LEIDRAAD VOOR EEN STAPSGEWIJZE EN  
INTEGRALE ONTWERPAANPAK

# HANDBOEK GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL



2015  
02



FEUILLETON  
BEEKHERSTEL

**stowa**

LEIDRAAD VOOR EEN STAPSGEWIJZE EN  
INTEGRALE ONTWERPAANPAK

# HANDBOEK GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL



**FEUILLETON  
BEEKHERSTEL**

---

*Dit onderzoek is uitgevoerd door Alterra, Wageningen UR, in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken.*

A photograph of a forest in autumn. The trees have yellow and orange leaves, and a stream flows through the forest. The text 'WOORD VOORAF' is overlaid on the image.

# WOORD VOORAF

---

Het schrijven van dit handboek maakte deel uit van het beleidsondersteunende (BO) onderzoeksprogramma Groen Nederland (BO-11-014) van het ministerie van Economische Zaken. De inhoudelijke begeleiding vanuit het ministerie was in handen van Wim Zeeman (DLG), daarin gesteund door andere leden van het kernteam van de CoP (Community of Practice) Hermeandering Beken. De CoP is een deskundigengroep van betrokkenen bij beekherstelprojecten die regelmatig bijeenkomt om ervaringen en kennis uit te wisselen. Het kernteam bestaat uit medewerkers van DLG, STOWA, waterschappen, terreinbeheerders en Alterra, en geeft sturing aan de activiteiten van de CoP.

Voormalig Alterra-medewerker Patrick Bogaart wordt hartelijk bedankt voor het verzamelen van materiaal voor dit handboek en het meedenken over de opzet en invulling ervan, in de voorbereiding van dit project. Door zijn vertrek bij Alterra kon hij helaas niet als auteur betrokken zijn. Vanuit diverse waterschappen hebben specialisten op het gebied van beekherstel een essentiële bijdrage geleverd aan dit handboek door het becommentariëren van conceptversies. Deze betrokkenen 'uit het veld' worden eveneens hartelijk bedankt voor hun tijd.

Hopelijk sluit dit handboek goed aan bij de praktische wensen die bestaan in de wereld van beekherstel en biedt de gekozen geomorfologische invalshoek velen een nieuw uitzicht op de aderen van het landschap én inspiratie voor 'natuurlijk gevormde' herstelprojecten.

**BART MAKASKE EN GILBERT MAAS**

*Wageningen, december 2014*

---

## 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 onderzoeklijnen 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)

---

## INHOUDSOPGAVE

---

Woord vooraf	02
STOWA in het kort	04
Ten geleide	08
Samenvatting	10
Summary	12

---

<b>1</b>	<b>INLEIDING EN CONTEXT</b>	<b>14</b>
1.1	Aanleiding, doelstelling en opzet	15
1.2	De procesgeomorfologische benadering	21
1.3	Doelen in beekherstel	24
1.4	Beleidskaders	26

---

<b>2</b>	<b>THEORETISCH KADER</b>	<b>36</b>
2.1	De geomorfologie van beken en beekdalen	37
2.2	Sturende factoren voor beekmorfolgie	44
2.3	Geulpatronen	47
2.4	Veranderingen in geulpatroon	52
2.5	Hydraulische geometrie en meandergeometrie	56
2.6	Oeverontwikkeling	61
2.7	Hydraulica en sedimenttransport	67
2.8	Beddingvormen	75
2.9	Vegetatieruwheid	82
2.10	Morfodynamiek in de overstromingsvlakte	86

---

---

<b>3</b>	<b>GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL IN DE PRAKTIJK</b>	<b>96</b>
3.1	Een stappenplan voor het ontwerpproces	97
3.2	Uitvoering en fasering van maatregelen	108
3.3	Naar adaptief beekbeheer via monitoring en evaluatie	111
3.4	Praktijkvoorbeelden van geomorfologisch beekherstel	118
3.4.1	<i>Inleiding</i>	118
3.4.2	<i>Case Hagmolenbeek</i>	118
3.4.3	<i>Case Overijsselse Vecht</i>	130
<hr/>		
<b>4</b>	<b>LITERATUUR EN BIJLAGEN</b>	<b>150</b>
	Aangehaalde literatuur	151
<b>Bijlage 1</b>	Natuurbeheertypen voor beken en beekdalen uit de Index Natuur en Landschap	157
<b>Bijlage 2</b>	Landschappelijke beektypen	171
<hr/>		
	Colofon	186



---

# TEN GELEIDE

---

Beken vormen de aderen van ons landschap. Ze huisvesten waardevolle ecosystemen, ze vormen transportbanen voor vitale stoffen en organismen en ze reguleren de afvoer van water naar benedenstroomse gebieden.

In de vorige eeuw is op veel plaatsen gewerkt aan ‘normaliseren’ (veelal rechttrekken en bedijken) van beken. Dit vergrootte de afvoercapaciteit en verkleinde de kans op wateroverlast. Inmiddels kennen we hiervan ook de nadelen. Bekken voeren het water nu vaak té snel af, waardoor al kort na overvloedige neerslag weer water moet worden aangevoerd. Ze snijden te diep in het landschap, waardoor de beken drainerend werken en het omliggende land verdroogt. De veranderde hydrologie heeft ook gevolgen gehad voor landschappelijke en ecologische waarden in het beekdal. Meanders zijn kortgesloten, overstromingsvlakten zijn verdwenen en typische flora en fauna zijn aangetast.

De laatste jaren worden veel beekherstelprojecten uitgevoerd en staan er diverse op de agenda. Hierbij wordt veelal gewerkt aan meerdere doelen:

- herstel van de leefomgeving om de terugkeer van organismen mogelijk te maken;
- invulling geven aan Waterbeheer 21<sup>e</sup> eeuw: vasthouden en bergen van water en het verzachten van de gevolgen van klimaatveranderingen;
- het herstel van cultuurhistorische waarden.

Om de verschillende aspecten van beekherstel te belichten, geeft STOWA een **beekfeuilleton** uit. Voor u ligt deel 1: **Handboek geomorfologisch beekherstel**. Aanleiding voor dit handboek is dat in veel beekherstelprojecten de beekbedding een nieuwe vorm krijgt. Het handboek bevat een praktisch stappenplan voor het ontwerpproces, maar ook een theoretisch kader. Ook worden praktijkvoorbeelden gegeven.

Het handboek - financieel mede mogelijk gemaakt door het ministerie van Economische zaken - is tot stand gekomen dankzij de noeste arbeid van Bart Makaske en Gilbert Maas van Alterra, onderdeel van WUR. Het kernteam van de CoP Hermeandering Bekken heeft de beide auteurs met veel enthousiasme begeleid. Wij hopen dat het handboek bijdraagt aan een effectieve aanpak van beekherstel, zodat wij en toekomstige generaties kunnen blijven genieten van deze aderen in ons landschap!

**JOOST BUNTSMA**

*Directeur STOWA*

---

## SAMENVATTING

---

In Nederland zijn momenteel vele beekherstelprojecten in uitvoering of gepland. In deze projecten wordt de vorm van beken veranderd om de veelal rechtgetrokken waterlopen een natuurlijker karakter te geven. Dit handboek heeft als doel om betrokkenen bij beekherstelprojecten te ondersteunen door het geven van: (1) een leidraad voor het ontwerp van een nieuwe beekbedding, (2) informatie over de te verwachten morfodynamische processen na herstel en (3) richtlijnen voor beheer en monitoring van de herstelde beek.

In dit handboek wordt gebruik gemaakt van kennis uit de geomorfologie, de wetenschap die zich bezighoudt met het beschrijven en verklaren van de vormen aan het aardoppervlak, waaronder beken en rivieren. Voor de vorming van beken en rivieren onder natuurlijke condities zijn wetmatigheden afgeleid die bruikbaar zijn in beekherstel. Het toepassen van geomorfologische principes in beekherstel wordt *geomorfologisch beekherstel* genoemd en behelst het opnieuw vormgeven van de bedding van een beek, zodanig dat de dimensies en het patroon van de herstelde bedding passen bij de afvoer en de natuurlijke terreingesteldheid. De filosofie achter geomorfologisch beekherstel is dat het leidt tot een duurzaam dynamisch evenwicht dat onderhouden wordt door natuurlijke geomorfologische processen die op hun beurt ecosysteemherstel kunnen aanjagen.

Dit handboek heeft drie onderdelen. Het eerste deel beschrijft de kern van de hier gekozen geomorfologische benadering en de doelen en de context van beekherstel in Nederland. In het tweede deel wordt de theoretische kennis gegeven die nodig is voor het ontwerp van een nieuwe beekbedding en voor het voorspellen van morfodynamische processen. Het derde deel biedt praktische informatie voor beekherstel met een stappenplan voor het ontwerpproces, adviezen voor de uitvoering en het beheer en praktijkvoorbeelden van geomorfologisch beekherstel.

In dit handboek wordt een stapsgewijze en integrale benadering van het ontwerpproces voorgesteld. In deze stapsgewijze aanpak zijn (tussentijdse) evaluatie en toetsing sturend voor het ontwerpproces. De stapsgewijze aanpak heeft een integraal karakter: informatie uit verschillende sectoren/disciplines wordt in verschillende stappen ingebracht en in het ontwerp verwerkt. Inschatting van toe-

---

---

komstige morfodynamische processen is hierbij een cruciaal onderdeel van het ontwerpproces, evenals het vormgeven van monitoring en beheer na herstel.

- Het belangrijkste onderdeel van dit handboek is het **stappenplan** voor het ontwerpproces. Dit omvat de zeven essentiële stappen die nodig zijn om te komen tot een geomorfologisch verantwoord ontwerp van een nieuwe waterloop bij beekherstel. **Stap 1** wordt gevormd door een ruimtelijke analyse op basis van beschikbare gegevens. **Stap 2** is een voorspelling van het toekomstige geulpatroon en bijbehorende morfodynamiek van de beek op basis van kwantitatieve gegevens over afvoer, verhang en sediment. In **stap 3** wordt de voorspelling geëvalueerd, deels op basis van gegevens uit stap 1. In **stap 4** worden breedte, diepte en, indien van toepassing, afmetingen van meanderbochten berekend met empirische geomorfologische relaties. In **stap 5** vindt de verdere ruimtelijke uitwerking van het ontwerp plaats. In deze stap worden ruimtelijke gegevens uit andere sectoren (bijvoorbeeld ecologie, infrastructuur en cultuur-historie) betrokken in het ontwerp. In **stap 6** wordt het ruimtelijk uitgewerkte ontwerp met modellen getoetst op hydraulische en hydrologische effecten. Op basis van de toetsingsresultaten kan het ontwerp bijgesteld worden of kunnen voorzieningen gepland worden om ongewenste omstandigheden op te vangen. In **stap 7** worden de plannen voor monitoring en beheer van de ontworpen beekloop uitgewerkt. Deze plannen sluiten aan bij de geomorfologische karakteristieken van de herstelde beek en maken integraal onderdeel uit van het ontwerp.

---

## SUMMARY

---

### **GEOMORPHOLOGICAL STREAM RESTORATION HANDBOOK GUIDELINES FOR A STEPWISE AND INTEGRAL DESIGN PROCEDURE**

In the Netherlands many stream restoration projects are currently being carried out or planned for the near future. In these projects the cross-sectional shape and planview configuration of stream channels is changed in order to create a more natural water system. This handbook aims to support those who are involved in stream restoration projects by providing: (1) guidelines for channel design, (2) information about morphodynamic processes that may be expected after restoration, and (3) guidelines for maintenance and monitoring of the stream after restoration.

In this handbook geomorphological knowledge is used. Geomorphology is the scientific discipline devoted to the description and explanation of earth surface landforms, including streams and rivers. For the formation of streams and rivers under natural conditions universal rules have been deduced that are useful in stream restoration. The application of geomorphological principles in stream restoration is called *geomorphological stream restoration* and comprises reshaping the bed of a stream in such a way that its dimensions and planview pattern fit with the discharge and natural terrain conditions. The philosophy behind this approach in stream restoration is that it will lead to a sustainable dynamic equilibrium that is maintained by natural geomorphological processes that on their turn energize the recovery of stream ecosystems.

This handbook consists of three parts. In the first part the basics of the geomorphological approach and the aims and context of stream restoration in the Netherlands are described. The second part provides the theoretical knowledge needed to design a new stream bed and to predict morphodynamic processes. The third part provides practical information for stream restoration with a stepwise design scheme, advices for project execution and stream maintenance, and examples of geomorphological stream restoration in practice.

In this handboek a stepwise and integral approach of the design process is proposed. In this stepwise approach (meantime) evaluation and testing are giving di-

---

---

rection to the design process. The stepwise procedure is integral by nature: information from different fields/disciplines feeds different design steps. Assessment of future morphodynamic processes is a crucial element of the design process, as well as the planning of stream monitoring and maintenance activities after restoration.

- ➔ The most important part of this handbook is the **step-by-step scheme** for the design process. The scheme comprises seven essential steps leading to a geomorphologically sound channel design in a stream restoration project. **Step 1** includes a spatial analysis of available sources. **Step 2** is a prediction of the future stream channel pattern and its morphodynamics based on quantitative data on discharge, slope and sediments. In **step 3** the prediction is evaluated, partly using data from step 1. In **step 4**, width and depth and, when applicable, meander dimensions are calculated using empirical geomorphological equations. In **step 5** the channel design is further elaborated spatially. In this step the design is harmonized with spatial data from other fields (e.g., ecology, infrastructure, cultural history). In **step 6** the spatially elaborated design is tested with models on hydraulic and hydrological impacts. Based on the test results the design is adapted or measures are planned to mitigate/eliminate undesired effects. In **step 7** plans for monitoring and maintenance of the restored stream are elaborated. These plans fit with the specific geomorphological characteristics of the stream and are an integral part of the design.

---

# H1 INLEIDING EN CONTEXT



---

## 1.1 AANLEIDING, DOELSTELLING EN OPZET

Beken zijn de aderen van het landschap. Ze huisvesten waardevolle ecosystemen, vormen transportbanen van vitale stoffen en levende soorten, en reguleren de afvoer van water naar benedenstroomse gebieden. Vanwege deze belangrijke functies is er veel aandacht voor beekherstel, waarbij wordt getracht het natuurlijk functioneren van beken, die in het algemeen door menselijke ingrepen in het verleden achteruit is gegaan, te verbeteren. Beekherstel gebeurt op grote schaal, zoals onder meer blijkt uit het Nationaal Waterplan dat herstelwerkzaamheden voor 2456 km aan beeklengte in Nederland beschrijft voor de periode 2010-2015.

In beekherstelprojecten wordt vaak de vorm van beken veranderd, teneinde de in het verleden veelal rechtgetrokken waterlopen een natuurlijker karakter te geven. Dergelijke aanpassingen aan een beek maken vaak deel uit van een project waarin een verbetering van de ecologische toestand van de beek nagestreefd wordt. Op Europees, nationaal en regionaal niveau zijn er beleidsopgaven om de ecologische toestand van watersystemen te verbeteren. Daarnaast zijn veranderingen in waterbeheer een motivatie achter beekherstelprojecten. In het licht van klimaatverandering en de daarmee mogelijk gepaard gaande grotere neerslaghoeveelheden, is er de behoefte ontstaan om water veilig te kunnen bergen en tijdelijk vast te kunnen houden in kleine watersystemen. Beekherstelprojecten kunnen bijdragen aan het vasthouden en bergen van water dicht bij de bron. Dit kan tevens helpen de gevolgen van langdurige droogtes te verzachten, die als gevolg van klimaatverandering vaker voor kunnen komen.

Beekherstel kent dus meerdere doelen en krijgt vorm door diverse maatregelen. Eén van de maatregelen die in veel beekherstelprojecten voorkomt is het opnieuw vormgeven van de bedding van de beek, waarbij deze doorgaans ondieper wordt en een grotere lengte (en dus een meer slingerend verloop) krijgt. Bij het creëren van een meer slingerende loop wordt vaak van hermeandering gesproken. Deze term verwijst naar het terugbrengen van het patroon dat veel beken op historische kaarten kenmerkt. Wetenschappelijk gezien is de term ‘hermeandering’ ongelukkig, omdat het meanderen van waterlopen verplaatsing van bochten door afkalving in de buitenbocht en aanwas in de binnenbocht inhoudt. Het is onduidelijk in hoeverre dit proces speelde in historische beeklopen en het is vaak onbekend of dit na ‘herstel’ op zal gaan treden.



---

In de praktijk van beekherstel in Nederland bestaan er nog veel vragen over het ontwerp en de vormgeving van beekbeddingen. Deze vragen zijn in twee categorieën te verdelen. De eerste categorie omvat vragen over wat het ‘juiste’ ontwerp is en hoe tot dit ontwerp gekomen moet worden. Het gaat hierbij om vragen zoals de onderstaande.

- In hoeverre moet de herstelde beek aansluiten bij de historische situatie?
- Hoeveel ruimte is nodig voor de herstelde loop?
- Welke breedte en diepte moet de herstelde bedding hebben?
- In hoeverre kan de herstelde loop piekafvoeren aan?

De tweede categorie omvat vragen over de ontwikkeling en verwachte dynamiek van de herstelde beek. Voorbeelden van dit soort vragen volgen hieronder.

- Welke morfodynamiek zal de herstelde beek vertonen?
- Hoe moet de herstelde beek beheerd worden?
- Welke monitoring van morfodynamiek moet na beekherstel plaatsvinden?

In dit handboek zullen de belangrijkste vragen uit beide categorieën beantwoord worden. Het uitgangspunt hierbij is dat beekherstel volgens geomorfologische principes plaatsvindt. De geomorfologie is de wetenschap die zich bezighoudt met het beschrijven en verklaren van de vormen aan het aardoppervlak. Een deel van dit vakgebied richt zich op de vormen die onder invloed van stromend water tot stand komen, zoals beken en rivieren. Voor de vorming van beken en rivieren onder natuurlijke condities zijn wetmatigheden afgeleid die bruikbaar zijn in beekherstel.

Het toepassen van geomorfologische principes in beekherstel wordt *geomorfologisch beekherstel* genoemd, en behelst het opnieuw vormgeven van de bedding van een beek, zodanig dat de dimensies en het patroon van de herstelde bedding passen bij de afvoer en de natuurlijke terreingesteldheid. We spreken hierbij gemakshalve van herstel, maar dit hoeft niet altijd een terugkeer naar een historisch bekend beeld van de beek te betekenen. Herstel heeft in deze context vooral betrekking op het beperken van de menselijke invloed op de vorm van de beek.

In de hydrologische wereld is momenteel de term hydromorfologie in zwang, wanneer het gaat om het beschrijven van waterlopen, zoals beken. Deze term wordt gebruikt om de fysische karakteristieken van een waterlichaam te beschrijven, zoals

---

zijn vorm, de aard van zijn grenzen en zijn (longitudinale) continuïteit. Onduidelijk is of de hydromorfologie ook de evolutie van die karakteristieken en de bijbehorende processen beschrijft, aspecten die, net als de morfologie van waterlopen, van oudsher behoren tot het domein van de geomorfologie. In dit handboek zal de term hydromorfologie verder niet gebruikt worden (behalve in [paragraaf 1.4](#) waar de Kaderrichtlijn Water beschreven wordt). De kern van de gekozen geomorfologische benadering wordt uiteengezet in de volgende paragraaf.

---

**Dit handboek heeft het doel om ontwerpregels te geven voor geomorfologisch beekherstel, een beeld van de te verwachten morfodynamische processen na herstel, en richtlijnen voor beheer en monitoring.**

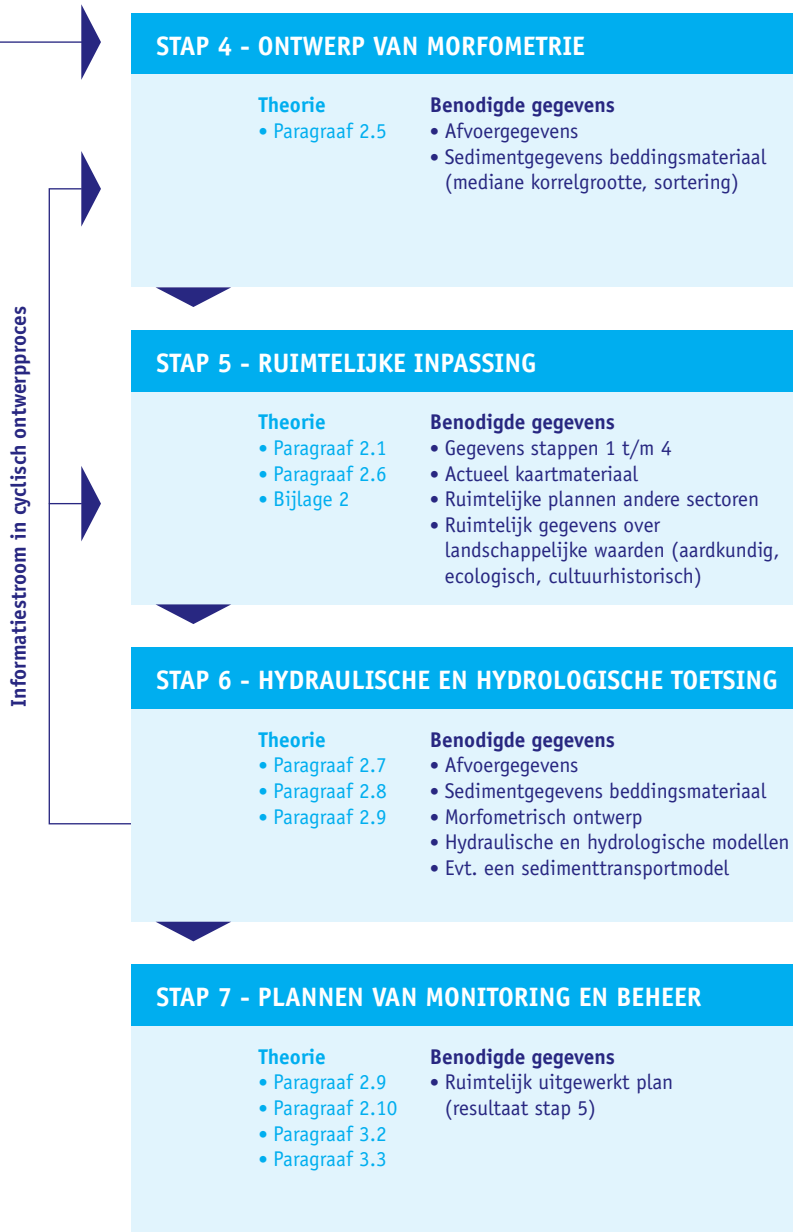
---

In dit handboek wordt een stapsgewijze en integrale benadering van het ontwerpproces voorgesteld. In deze stapsgewijze aanpak zijn (tussentijdse) evaluatie en toetsing kernbegrippen die het ontwerpproces sturen. De stapsgewijze structuur biedt de mogelijkheid om nieuwe inzichten en gegevens, die tijdens het ontwerpproces ontstaan of beschikbaar komen, op een systematische wijze te verwerken. De stapsgewijze aanpak heeft een integraal karakter: informatie uit verschillende sectoren/disciplines wordt in verschillende stappen ingebracht en in het ontwerp verwerkt. Het is belangrijk zich er rekenschap van te geven dat het ontwerp geen eindsituatie oplevert, maar een dynamisch systeem, en dat daarom een inschatting van toekomstige morfodynamische processen een integraal onderdeel van het ontwerpproces moet zijn. De dynamiek van een beek wordt in beeld gebracht door systematische monitoring en wordt beïnvloed door beheer. Monitoring levert belangrijke gegevens op om het beheer te kunnen sturen. Beide zijn daarom mede bepalend voor het uiteindelijke succes van geomorfologisch beekherstel.

De kern van dit handboek wordt gevormd door het *stappenplan* voor het ontwerpproces ([Fig. 1.1](#)), dat in [paragraaf 3.1](#) uitvoerig wordt beschreven. Het stappenplan omvat de zeven essentiële stappen die nodig zijn om te komen tot een geomorfologisch verantwoord ontwerp van een nieuwe waterloop bij beekherstel. Bij het doorlopen van de zeven stappen worden gaandeweg de bovenstaande ontwerp vragen beantwoord. Stap 1 wordt gevormd door een ruimtelijke analyse op basis van

Fig 1.1 STAPPENPLAN VOOR HET ONTWERPPROCES VAN GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL





---

beschikbare gegevens. Stap 2 is een voorspelling van het toekomstige geulpatroon van de beek op basis van kwantitatieve gegevens over afvoer, verhang en sediment. Deze voorspelling betreft ook de bij het patroon behorende morfodynamiek. In stap 3 wordt de voorspelling geëvalueerd, deels op basis van gegevens uit stap 1. In stap 4 worden breedte, diepte en, indien van toepassing, afmetingen van meanderbochten berekend met empirische geomorfologische relaties. De verdere ruimtelijke uitwerking van het ontwerp, met als leidraad het voorspelde patroon en de berekende afmetingen, vindt plaats in stap 5. In deze stap worden ruimtelijke gegevens uit andere sectoren (bijvoorbeeld ecologie, infrastructuur en cultuurhistorie) betrokken in het ontwerp. Wanneer een volledig ruimtelijk uitgewerkt ontwerp beschikbaar is, kan dit met modellen getoetst worden op hydraulische en hydrologische effecten. Aan de hand van de toetsingsresultaten kan het ontwerp eventueel bijgesteld worden of kunnen voorzieningen ingepland worden om ongewenste omstandigheden op te vangen. De gegevens van stap 6 vormen dan invoer waarmee stap 4 en/of stap 5 opnieuw doorlopen worden. Hierdoor ontstaat een cyclisch ontwerpproces. In stap 7, ten slotte, worden de plannen voor monitoring en beheer van de ontworpen beekloop uitgewerkt. Deze plannen sluiten aan bij de geomorfologische karakteristieken van de herstelde beek en maken integraal onderdeel uit van het ontwerp.

Dit handboek valt in drie delen uiteen. Dit eerste deel beschrijft, na deze inleiding, de kern van de hier gekozen geomorfologische benadering ([paragraaf 1.2](#)) en de doelen en de context van beekherstel in Nederland ([paragrafen 1.3](#) en [1.4](#)). In het tweede deel wordt de benodigde theoretische kennis voor het uitvoeren van het stappenplan gegeven. De volgorde waarin de kennis gepresenteerd wordt komt ruwweg overeen met volgorde waarin zij nodig is in het stappenplan. De relevante paragrafen voor bepaalde stappen zijn in [Figuur 1.1](#) aangegeven. Het derde deel biedt praktische informatie voor beekherstel met een uitgebreide beschrijving van het stappenplan, een leidraad voor de uitvoering en het beheer en praktijkvoorbeelden van geomorfologisch beekherstel.

Dit handboek is gericht op verschillende doelgroepen, die elk vanuit hun specifieke ecologische of hydrologische achtergrond door beleidskaders (zie [paragraaf 1.4](#)) en/of -doelen (zie [paragraaf 1.3](#)) gemotiveerd worden om te werken aan, of kennis te nemen van, geomorfologisch beekherstel. Ten eerste zijn dat de planvormers en ontwerpers van beekherstelprojecten. Zij vinden in dit handboek handvatten om

---

robuuste ontwerpen te maken en maatregelen te treffen om beken in een nieuw natuurlijk evenwicht te brengen. Dit kunnen ‘waterschappers’ zijn die vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) werken aan het verbeteren van de ecologische toestand van waterlopen of die zorgen voor de implementatie van WB21-maatregelen voor een veerkrachtiger watersysteem, maar ook medewerkers van andere overheden en gebiedsontwikkelaars van particuliere bureaus die krachtens Natura 2000, EHS of KRW te maken hebben met instandhoudingsdoelstellingen voor beekflora en -fauna. De tweede doelgroep van dit handboek zijn de beheerders van beken. Er wordt wel eens gezegd dat 80% van het succes van beekherstel zit in de wijze waarop na het uitvoeren van de maatregelen de beek wordt beheerd. Dit handboek geeft beheerders inzicht in de uitgangspunten van het ontwerp en welke processen er na afronding van de inrichting kunnen plaatsvinden, voordat (en nadat) de beek het natuurlijke evenwicht heeft bereikt. De derde doelgroep van dit handboek wordt gevormd door aankomende ecologen, hydrologen en groene ontwerpers die in het kader van hun opleiding zich willen verdiepen in geomorfologisch beekherstel.

## 1.2 DE PROCESGEOMORFOLOGISCHE BENADERING

Door de eeuwen heen zijn beken onderdeel geweest van een dynamisch landschap. Talloze interacties tussen beek en omgeving hebben de huidige beken vorm gegeven. Er zijn ruwweg vijf factoren te onderscheiden die bepalend zijn (geweest) voor de huidige geomorfologie van beken. Deze factoren bepalen de landschappelijke context van de beek.

### 1 De hydrologie

Van groot belang voor de vorm van een beek is de hoeveelheid water die de beek af moet voeren en hoe die hoeveelheid varieert in de tijd. Deze variabele wordt in hoge mate bepaald door de eigenschappen van het stroomgebied en de menselijke activiteiten die daarin plaatsvinden. Over langere periodes bezien is de hydrologie niet constant, maar vertoont zij fluctuaties door veranderingen in landgebruik en klimaat.

### 2 De ondergrond

De beekloop ontstaat door interactie van stromend water met de ondergrond, waarbij de aard van de ondergrond bepalend is voor de intensiteit en richting van de vormende processen. De ondergrond kan bestaan uit grind, zand, klei, leem of veen, materialen met sterk verschillende weerstanden tegen de uitschurende

---

werking van stromend water. De ondergrond van een beekloop is gevormd in een lange geologische geschiedenis en ruimtelijk variabel.

### 3 Het reliëf

De intensiteit van de geomorfologische processen wordt ook bepaald door het reliëf. Het verhang van de beekloop bepaalt immers de stroomsnelheid van het water. Ook speelt mee of de beek in een smal dal ligt of in een uitgestrekte vlakte en of de beek geflankeerd wordt door oeverwallen.

### 4 De vegetatie

De begroeiing in en langs de beek beïnvloedt de geomorfologische processen door de weerstand die zij biedt aan de stroming en de uitschurende krachten van de beek. Begroeiing in en langs de beek kan er ook voor zorgen dat sedimenten worden ingevangen.

### 5 De mens

Indirect via de bovengenoemde factoren en door directe ingrepen in de beek beïnvloedt de mens de vorm van en de processen in de beek. In de loop der eeuwen is de invloed van de factor 'mens' dominant geworden.

---



---

De *procesgeomorfologie* probeert de relaties tussen bovengenoemde sleutelfactoren en de vorm van de beek in te schatten en te kwantificeren om de vorm van beken te kunnen verklaren en voorspellen. Deze verklaring of voorspelling betreft de vorm van de beek in een evenwichtssituatie waarin sleutelfactoren constant blijven. Wanneer sleutelfactoren veranderen zal de vorm van de beek veranderen in de richting van een nieuw evenwicht. Het kan lang duren voordat dit nieuwe morfologische evenwicht bereikt is. Wanneer het natuurlijke evenwicht van een beek door menselijke ingrepen is verstoord, wordt vaak door intensief beheer geprobeerd te voorkomen dat zich een nieuw (ongewenst) evenwicht instelt, bijvoorbeeld door het plaats en periodiek legen van zandvangen.

De tijdspanne die nodig is om een evenwicht te bereiken na verandering van sleutelfactoren (bijvoorbeeld door uitvoering van een beekherstelproject) wordt de *morfologische aanpassingstijd* genoemd. Het kan voorkomen dat een evenwicht niet bereikt wordt omdat nieuwe veranderingen in de sleutelfactoren plaatsvinden voordat zich een nieuw evenwicht ingesteld heeft. Binnen de morfologische aanpassingstijd is vaak sprake van versterkte morfodynamiek. In beekherstelprojecten treedt bijvoorbeeld net na graafwerkzaamheden veel morfodynamiek op in de periode dat de vegetatie zich nog niet volledig hersteld heeft. Wanneer een nieuw morfologisch evenwicht bereikt is, wil dat niet zeggen dat er geen erosie- of sedimentatieprocessen meer optreden, maar wel dat beekvormen in aard en afmetingen min of meer constant blijven. Omdat deze vormen nog wel kunnen migreren spreken we van een dynamisch evenwicht.

De *procesgeomorfologische benadering* in beekherstel gaat ervan uit dat herstel van natuurlijke geomorfologische processen een essentiële stap is voor herstel van aquatische en terrestrische beekgebonden ecosystemen. In deze benadering worden natuurlijke geomorfologische processen beschouwd als een motor voor ecologisch herstel en als randvoorwaarde in duurzaam waterbeheer. In de procesgeomorfologische benadering spelen relaties tussen de beek en de natuurlijke overstromingsvlakte en belangrijke rol, omdat er in de natuurlijke situatie uitwisseling van water en sediment is tussen beek en overstromingsvlakte. De morfodynamiek in de geul is daarom niet los te zien van de morfodynamiek in de terrestrische oeverzone en de overige (voormalige) beekoverstromingsvlakte. De vorming van oeverwallen door zandafzetting langs een herstelde beek, is het gevolg van processen in de beek en heeft invloed op de waterhuishouding en sedimentafzetting in de overstromingsvlakte.



---

Dit handboek zal zich in hoofdzaak beperken tot de procesgeomorfologische benadering van beekherstel. Andere benaderingen en aangrenzende kennisvelden zullen slechts kort worden besproken.

### 1.3 DOELEN IN BEEKHERSTEL

Beekherstel in dit handboek is erop gericht met maatregelen de beek en het beekdal terug te brengen in een nieuw dynamisch evenwicht, aangepast aan de actuele toestand en het functioneren van het landschap en zodanig dat de beek zichzelf duurzaam in stand kan houden. In een Amerikaans handboek voor beekherstel wordt dit als volgt verwoord: “*Restoration, as defined in this document, includes a broad range of actions and measures designed to enable stream corridors to recover dynamic equilibrium and function at a selfsustaining level*” (FISRWG, 1998). In de huidige Nederlandse context betekent beekherstel vaak het aanleggen van een bochtiger beekloop.

De meeste beekherstelprojecten in Nederland hebben een integrale doelstelling. Naast het verbeteren van de ecologische conditie van het beek- en beekdalecosysteem leveren de beekherstelmaatregelen meestal ook een bijdrage aan de verbetering van de hydrologische toestand van het watersysteem. Nieuwe mogelijkheden voor recreatie en toerisme vormen vaak de derde pijler van deze integrale benadering.

Ecologische doelen worden bij aanvang van het planproces voor beekherstel meestal vrij globaal omschreven, bijvoorbeeld als ‘een zo natuurlijk mogelijk beekdal waarin beekprocessen de ruimte krijgen’, of als ‘een meer natuurlijk systeem, waarin door natuurlijke processen weer mogelijkheden voor een hogere natuurkwaliteit ontstaan’. Deze globale doelstellingen worden in het vervolg van het planproces vertaald naar meer concrete te verbeteren ecologische condities van het beekstelsel, zoals:

- verbetering van de stromingscondities in de beek;
- meer natuurlijke processen in de beek;
- aanwezigheid van dood hout in de beek;
- verhoging van de grondwaterstand in het beekdal;
- toename van de overstromingsfrequentie van het beekdal.

De meest vergaande formulering van ecologische doelen voor beekherstel is het definiëren van te bereiken natuurdoeltypen die voortvloeien uit de EHS-, Natura 2000- en/of KRW-opgaven. In [paragraaf 1.4](#) zal hier nader op worden ingegaan.

---

De hydrologische doelstelling voor beekherstel wordt vaak omschreven als ‘herstel van de veerkracht van het watersysteem’. Beekherstel wordt gezien als een adaptieve maatregel waardoor een beek zich blijvend kan aanpassen aan veranderende klimatologische omstandigheden. Meer neerslag in korte heftige buien en langere perioden van droogte vragen om ingrepen in het bestaande oppervlaktewatersysteem, zodat piekafvoeren kunnen worden geborgen en perioden met weinig afvoer kunnen worden overbrugd. Concreter geformuleerd, hangen de waterdoelen voor beekherstel altijd samen met het creëren van meer retentie (bergingscapaciteit) en het vasthouden van water in de bodem en op het maaiveld of in waterlopen, waardoor de afvoer wordt vertraagd.

Beekherstel draagt vrijwel altijd bij aan een verhoging van de natuurlijkheid en beleevingswaarde van het landschap. Recreanten weten dit de waarden. Voor veel beekherstelprojecten is dit geen expliciete doelstelling, maar wordt dit gezien als een positief neveneffect. Er zijn voorbeelden in Nederland die laten zien dat als direct gevolg van grootschalige beekherstelprojecten de regionale economie werd gestimuleerd en kwijnende horecagelegenheden nieuw leven werd ingeblazen. Een succesfactor is dat de projectgebieden open worden gesteld voor extensieve recreatie.

Geomorfologisch beekherstel als maatregel grijpt in op de morfologie van een ‘genormaliseerde’ beek of klein riviertje en is gericht op het ecologische en hydrologische herstel van het watersysteem. Dit houdt in de huidige praktijk het volgende in:

- het profiel van de beek wordt verkleind en verondiept;
- de beekloop wordt verlengd en krijgt een slingerend verloop;
- een inundatievlakte wordt hersteld of gecreëerd. Deze inundatievlakte kan een natuurlijke beekoverstromingsvlakte zijn, of deel uitmaken van een tweefasenprofiel, afhankelijk van de beschikbare ruimte.

Bovenstaande maatregelen worden vaak toegepast in combinatie met het verwijderen en/of aanpassen (vispasseerbaar maken) van stuwen. De effectiviteit van beekherstel neemt toe naarmate de maatregelen over een grotere lengte van het beekstelsel wordt toegepast.

Hermeandering, in de zin van het aanleggen van een natuurlijker en bochtiger waterloop, uitgevoerd in samenhang met andere maatregelen voor een meer natuurlijke hydrologie in het stroomgebied, draagt bij aan vergroting van de veerkracht van het watersysteem door:

- 
- voldoende en gevarieerde stroomsnelheid;
  - natuurlijk variërende waterdiepte;
  - spontane beekprocessen, o.a. oeverserosie en sedimentatie;
  - variatie in beddingsubstraat (zand, grind, leem, detritus);
  - variatie in beddingvormen (bijvoorbeeld flauwe en steile oevers);
  - natuurlijke inundatie van de oevers en het beekdal.

De effecten van hermeandering op de hydrologie, waardoor de veerkracht van het watersysteem wordt vergroot zijn:

- demping van de afvoerpieken;
- verhoging van de basisafvoer van de beek;
- verhoging van de oppervlakte- en grondwaterstand bij lage afvoeren (tegengaan verdroging).

Natuurlijke beekprocessen zorgen voor een duurzame instandhouding van deze condities. Beekherstel wordt in de praktijk op veel verschillende manieren toegepast, afhankelijk van de Ausgangssituatie. De natuurlijkheid van de beek of de mate waarin het gehele stroomgebied in de loop der tijd is veranderd spelen hierbij een rol. De maatregel hermeanderen kan variëren van het reactiveren van een afgesneden natuurlijke beekloop tot het volledig graven van een nieuwe beekloop, na demping van de oude, en alles daartussenin. In alle gevallen gaat het om maatwerk.

#### 1.4 **BELEIDSKADERS**

De aanleiding voor beekherstelprojecten is doorgaans het realiseren van beleidsdoelstellingen op het gebied van natuur en water. Zowel Europese als nationale beleidskaders zijn van invloed op de wijze waarop beekherstel wordt uitgevoerd. Hieronder zal van de vier belangrijkste beleidskaders worden geschetst op welke manier zij van toepassing zijn op beekherstel in Nederland.

##### **EHS en Index Natuur en Landschap**

Ten behoeve van het Nederlandse natuurbeleid zijn diverse nota's geschreven vanuit het besef dat natuur en landschap een essentiële bijdrage leveren aan een leefbare en duurzame samenleving. Daarin zijn natuurdoelen beschreven voor het in stand houden en ontwikkelen van natuur. Vertrekpunt voor het actuele beleid is het Natuurbeleidsplan uit 1990 (Ministerie van LNV, 1990), waarin de realisatie

---

van een samenhangend stelsel van waardevolle natuurterreinen, de ecologische hoofdstructuur (EHS), centraal staat. Beken en beekdalen vormen een belangrijke schakel in deze ecologische hoofdstructuur. Uitgangspunt is het behoud van biodiversiteit op een zo natuurlijk mogelijke wijze (Bal *et al.*, 1995). Dit doel is in overeenstemming met de verplichtingen die voortvloeien uit het Biodiversiteitsverdrag (UNEP, 1992). In 2000 werd met ‘Natuur voor mensen, mensen voor natuur’ (Ministerie van LNV, 2000) de EHS nader uitgewerkt. Vanaf 2014 is de uitvoering van het EHS-beleid gedecentraliseerd, waarbij de verantwoordelijkheid bij de provincies is komen te liggen. De EHS gaat voortaan Natuurnetwerk Nederland (NN) heten (website ministerie van EZ).

Voor de vormgeving en inrichting van de ecologische hoofdstructuur (EHS/NN) is het systeem van natuurdoeltypen ontwikkeld (Bal *et al.*, 2001). Uitgangspunt van deze systematiek is dat een natuurdoeltype een in het natuurbeleid nagestreefd type ecosysteem is dat een bepaalde biodiversiteit en een bepaalde mate van natuurlijkheid als kwaliteitskenmerken heeft. Doelsoorten vormen de kern van een natuurdoeltype. Het zijn soorten die in het natuurbeleid met prioriteit aandacht krijgen vanwege hun beperkte aanwezigheid en/of hun achteruitgang op nationaal en/of internationaal niveau. Sinds de inwerkingtreding van de ‘Index Natuur



---

en Landschap' (Schipper & Siebel, 2009) in 2010 is het rijksbeleid voor natuur niet meer in termen van natuurdoelen geformuleerd, maar wordt de natuurtypologie van de index gebruikt die gericht is op beheer. Binnen het onderdeel natuur van de index worden 17 natuurtypen onderscheiden, opgesplitst in 47 beheertypen. Met deze natuurbeheertypen en onderliggende natuurdoeltypen zijn de kwaliteitsdoelen in de EHS vastgelegd. Een vertaaltabel van natuurdoeltypen naar de natuur(beheer)typologie van de index is opgenomen in [Bijlage 1](#).

Voor beken zijn in de 'Index Natuur en Landschap' in eerste instantie drie natuurtypen relevant als na te streven natuurdoel:

- Grootschalige dynamische natuur van zand- en kalklandschappen (N01.04);
- Rivieren (N02.01);
- Beken en bronnen (N03.01).

Naast deze drie natuurtypen vormen de beekdalen ook belangrijke groeiplaatsen voor onder andere Beekbegeleidende bossen (N14.01), Natte schraallanden (N10.01), Vochtige hooilanden (N10.02) en Droge schraallanden (N11.01).

Hieronder volgt een korte omschrijving van de drie relevante natuurbeheertypen voor beken uit de index (Schipper & Siebel, 2009). Een volledige beschrijving van de in dit hoofdstuk genoemde natuurbeheertypen voor zowel beken als beekdalen is opgenomen in [Bijlage 1](#).

#### *Grootschalige dynamische natuur van zand- en kalklandschappen (N01.04)*

Het natuurtype 'Grootschalige dynamische natuur van zand- en kalklandschappen' omvat de meer natuurlijke gebieden in het zand- en het kalklandschap, waarin vooral grondwaterstandsfluctuaties, successie en waterdynamiek van beken in combinatie met integrale begrazing het landschap vormen. Al naar gelang de ligging van het gebied bestaat het uit een groot scala van andere in zand- en kalkgebieden voorkomende beheertypen, die echter vanwege continue veranderingen in het landschap niet in omvang en ligging apart in het beheer kunnen worden vastgelegd. De randvoorwaarden voor dit natuurbeheertype zijn: (1) dat het betreffende gebied ligt in één van de Zandlandschappen of het Heuvellandschap, (2) dat het landschap wordt gevormd door natuurlijke processen, zoals de werking van wind, (stromend) water en/of grote grazers, en (3) dat de natuureenheid tenminste 500 ha groot is of onderdeel is van een grotere eenheid grootschalige dynamische natuur.

---

### *Rivieren (N02.01)*

Het beheertype 'Rivieren' omvat, naast al het stromend water en de uiterwaarden van de Rijntakken en de Maas, ook een aantal zijtakken, kleine rivieren of grote beken, zoals de Roer, de Niers en de Overijsselse Vecht. Iedere rivier of ieder riviertraject heeft een eigen karakter. De kleine rivieren stromen door zandige gebieden, meanderen breed en hebben soms vrij hoge zandige oeverwallen. In de zomer is er soms weinig wateraanvoer. De variatie in stroomsnelheid en waterkwaliteit is groot, en morfodynamische processen zorgen voor een hoge diversiteit. De (kleine) rivieren zijn internationaal en nationaal van groot belang als leefgebied voor trekvogels, vissen, libellen, kokerjuffers, steenvliegen en haften. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om soorten als rivierrombout, bataafse stroommossel, platte zwanenmossel, bever, barbeel, kopvoorn, rivierdonderpad, meerval, riviergrondel, sneep, winde, rivierprik, zeeprik en aal. Vooral voor trekvis, zoals elft, fint, houting, steur en zalm, die in Nederland vrijwel niet meer voorkomen, is het belang groot. Slechts enkele waterplanten komen voor in de rivier zelf: rivierfonteinkruid en doorgroeid fonteinkruid (nu alleen in kleine rivieren).

Door vergroting van de overstromingsvlakten, verbetering van de waterkwaliteit, verbetering van de mogelijkheden voor vistrek, verbetering van de aansluitingen op beken, vergroting van de variatie in verschillende typen wateren en het spontaan laten ontstaan van zandige oevers kan echter veel gewonnen worden. Vooral de kleine rivieren bieden hiervoor perspectief.

### *Beken en bronnen (N03.01)*

Het beheertype 'Beken en bronnen' omvat de natuurlijke waterlopen op de zand- en lössgronden van Noord-, Oost- en Zuid-Nederland, en in de duinen. Het gaat om kleine stromende wateren met hun bronnen, zoals de Regge, de Dinkel, de Berkel, de Dommel, en de Swalm, die uiteindelijk uitmonden in een rivier, in Oost- en Zuid-Nederland, of in een (voormalig) estuarium (Drentse Aa en Boorne in Noord-Nederland). (Mee)stromende wateren zoals molenkolken, sprengen en opgeleide beken behoren eveneens tot dit type.

Beken en bronnen zijn van groot belang voor waterranonkels, fonteinkruiden en sterrekroossoorten, aquatische macrofaunasoorten, rivierkreeft en een groot aantal rheofiele vissen, zoals beekforel, beekprik, en elrits. De beken met beekprik, zeeprik, gaffellibel en begroeiingen met drijvende waterweegbree, waterranonkels of teer

---

vederkruid, zijn in internationaal opzicht belangrijk (in het kader van Natura 2000).

### Natura 2000

Natura 2000 is een Europees initiatief voor een samenhangend netwerk van beschermde natuurgebieden op het grondgebied van de lidstaten van de Europese Unie. Dit netwerk vormt de hoeksteen van het EU-beleid voor behoud en herstel van biodiversiteit. Natura 2000 omvat alle gebieden die zijn beschermd door de Vogel- en Habitatrichtlijnen van de EU. Het gaat hier dus om gebieden met grote natuurwaarden. Nederland heeft 166 gebieden aangemeld om onderdeel uit te maken van het Nederlandse deel van het Natura 2000-netwerk. In het aanwijzingsbesluit van elk gebied staat de exacte begrenzing en welke natuurwaarden (vogels, planten, dieren en hun leefgebieden) we in welke kwaliteit (de doelen) in deze gebieden willen beschermen. Voor elk Natura 2000-gebied moet een beheerplan worden opgesteld waarin staat wat er moet gebeuren om de natuurdoelen voor dat gebied te halen en wie dat gaat doen.

Onder de Natura 2000-gebieden bevinden zich een aantal beken en beekdalen, zoals onder andere de Drentsche Aa, het Dinkelland, de Bekendelle, het Swalmdal en het Geuldal. Ook in Natura 2000-gebieden als de Veluwe en de Kampina en Oisterwijkse Vennen komen waardevolle beekdalsystemen voor.

In het kader van Natura 2000 zijn in Nederland voor 51 habitattypen, 36 habitattoorten en 95 vogelsoorten, instandhoudingsdoelstellingen geformuleerd. Een toelichting op verschillende ecologische kenmerken en vereisten van deze habitattypen, habitattoorten en vogelsoorten wordt gegeven in het Natura 2000-profielendocument (Ministerie van LNV, 2006). Relevante Natura 2000-habitattypen en -soorten in verband met beekherstel zijn hieronder opgesomd.

### Habitattypen

- Beken en rivieren met waterplanten (H3260)
- Stroomdalgraslanden (H6120)
- Zinkweiden (H6130)
- Blauwgraslanden (H6410)
- Glanshaver- en vossenstaarthooilanden (H6510)
- Kalkmoerassen (H7230)
- Vochtige alluviale bossen (H91E0)

---

### Habitatsoorten

- Beekprik (H1096)
- Drijvende waterweegbree (H1831)
- Gaffellibel (H1037)
- Kamsalamander (H1166)
- Kleine modderkruiper (H1149)
- Rivier- en beekdonderpad (H1163)

### Vogelrichtlijnsoorten

- Ijsvogel (A229)
- Oeverwaluw (A249)

### Nationaal waterbeleid en beekherstel

In 1985 werd met het uitkomen van de nota 'Omgaan met Water' (Ministerie van V&W, 1985) het concept *integraal waterbeheer* geïntroduceerd. In de Derde en Vierde Nota Waterhuishouding (Ministerie van V&W, 1989, 1998) kreeg integraal waterbeheer verder vorm met kernbegrippen als *watersysteembenadering* en *interne en externe samenhang*. Meer dan voorheen richt het waterbeleid zich sinds het verschijnen van deze nota's op alle aspecten van het watersysteem. In integraal waterbeheer bestaat het watersysteem uit het geheel van oppervlakte- en grondwater en de bijbehorende waterbodems, oevers, flora en fauna, waterkeringen en technische infrastructuur, en hun onderlinge relaties. Samenhang betekent ook dat kwaliteits- en kwantiteitsaspecten van het watersysteem niet los van elkaar kunnen worden gezien. Door het benadrukken van de externe functionele samenhangen van het watersysteem raakte het waterbeleid verweven met andere beleidsterreinen, zoals ruimtelijke ordening, natuur en milieu.

Een belangrijke, daarop volgende, ontwikkeling in het waterbeleid én een motor voor beekherstel was de nota 'Waterbeleid voor de 21<sup>e</sup> eeuw' (Ministerie van V&W, 2000), ook wel WB21 genoemd. Naar aanleiding van de hoge rivierafvoeren in 1993 en 1995 en de regionale wateroverlast in 1998 werd een nieuwe visie op het waterkwantiteitsbeheer geïntroduceerd. De kerngedachte van WB21 is dat er meer ruimte voor water nodig is. De bewustwording van de impact van klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en verstedelijking op het watersysteem leidde tot deze nieuwe benadering van het waterbeleid.



---

Het doel van WB21 is het duurzaam op orde brengen van het watersysteem, daarbij rekening houdend met de effecten van klimaatverandering; kortweg het verhogen van de *veerkacht*. Het adagium van WB21 is de trits *vasthouden-bergen-afvoeren*. Watersystemen dienen zodanig ingericht te worden dat beken en waterlopen in de haarvaten het water zo lang mogelijk (in de bodem) vasthouden, dat in beekdalen voldoende ruimte wordt gecreëerd om water (op het maaiveld of in de waterlopen) te bergen en dat het water pas in de benedenloop van regionale systemen richting de grote rivieren, en uiteindelijk naar de Noordzee, wordt afgevoerd.

Voor de uitvoering van het WB21-beleid sloten het Rijk, het Interprovinciaal Overleg, de Unie van Waterschappen en de Vereniging van Nederlandse Gemeenten de Startovereenkomst Waterbeleid 21<sup>e</sup> eeuw (2001). Daarmee werd de eerste stap gezet in het tot stand brengen van de noodzakelijke gemeenschappelijke aanpak. Twee jaar later zijn de resultaten van die samenwerking en van voortschrijdende kennis omtrent het thema neergelegd in het Nationaal Bestuursakkoord Water (Ministerie van V&W, UvW, IPO, VNG, 2003). In 2008 hebben betrokken overheden een vernieuwd bestuursakkoord gesloten (Ministerie van V&W, UvW, IPO, VNG, 2008). De belangrijkste doelstelling was om in 2015 het watersysteem in het stedelijk en landelijk gebied op orde te hebben. Afgesproken is dat de trits vasthouden-bergen-afvoeren verder in de praktijk wordt gebracht. Waterschappen hebben daarvoor een programma van maatregelen opgenomen in hun *Waterbeheerplannen*. Het vergroten van ruimte voor water en het voorkomen van wateroverlast kan worden bereikt door beekdalbreed herstel van beeksystemen, waarin de beekdalen fungeren als retentiegebieden.

### Kaderrichtlijn Water

In 2000 is de Kaderrichtlijn Water (KRW) van kracht geworden (Europese Unie, 2000). EU-breed zijn in de KRW afspraken gemaakt om aquatische ecosystemen te beschermen en te verbeteren en water duurzamer te gebruiken. Het doel van de KRW is om voor alle watersystemen in 2015 een 'goede ecologische en chemische toestand' te bereiken.

Per stroomgebied binnen de EU zijn alle oppervlaktewateren begrensd en ingedeeld in categorieën en typen. De KRW kent vier categorieën natuurlijke watertypen: rivieren, meren, overgangswateren, en kustwateren. Bekken worden in deze indeling gerekend tot de rivieren. De categorie rivieren omvat 18 watertypen, die

zijn ingedeeld op, onder meer, stroomsnelheid en bodemmateriaal. Per type waterlichaam zijn ecologische referentiecondities bepaald die gelden voor dat watersysteem in een natuurlijke, nagenoeg ongestoorde toestand; in KRW-termen: een ‘Zeer Goede Ecologische Toestand (ZGET)’. Deze referentietoestand is het hoogste van de vijf niveaus op de ‘maatlat’ waarlangs de biologische kwaliteit van de waterlichamen wordt gemeten. De norm voor alle natuurlijke wateren is het bereiken van minimaal een ‘Goede Ecologische Toestand (GET)’. Voor de chemische toestand van waterlichamen is een aparte maatlat opgesteld.

De maatlatten voor de beoordeling van ecologische toestand vallen uiteen in kwaliteitselementen die de biologische, de hydromorfologische en de algemeen fysisch-chemische toestand van het waterlichaam beschrijven (Tabel 1.1). Per kwaliteitselement zijn voor diverse parameters normen opgesteld waaraan een waterlichaam moet voldoen om als ‘goed’ beoordeeld te worden.

**TABEL 1.1 KRW-KWALITEITSELEMENTEN**

*Kwaliteitselementen die de biologische, de hydromorfologische en de algemeen fysisch-chemische toestand van KRW-waterlichaam beschrijven.*

BIOLOGISCH	HYDROMORFOLOGISCH	ALGEMEEN FYSISCH-CHEMISCH
Samenstelling en abundantie waterflora	Afvoerregiem	Temperatuur
Samenstelling en abundantie macrofauna	Riviercontinuïteit	Zuurstofhuishouding
Samenstelling, abundantie en leeftijdsopbouw van vis	Morfologie	Zoutgehalte, verzurings-toestand, nutriënten

Naast natuurlijke wateren worden kunstmatige, door de mens gecreëerde, en sterk veranderde wateren onderscheiden. Een sterk veranderd water is een van oorsprong natuurlijk oppervlaktewater waarvan het karakter door menselijke activiteit substantieel veranderd is, zoals een gekanaliseerde beek. Hiervoor gelden andere maatlatten en minder hoge doelstellingen. Het ‘Maximaal Ecologisch Po-

tentieel' (MEP), de referentie voor sterk veranderde en kunstmatige wateren, is een afgeleide van de KRW-waardering van het meest gelijkende natuurlijke watertype. Het minimale kwaliteitsniveau waaraan deze sterk veranderde en kunstmatige waterlichamen moeten gaan voldoen is een 'Goed Ecologisch Potentieel (GEP)'.

**TABEL 1.2 OVERZICHT VAN KRW-MAATREGELEN OP HOOFDLIJNEN IN NEDERLAND**

(Ministerie van V&W, 2009)

KRW-MAATREGELEN						
2010-2015	EEMS	MAAS	RIJN	SCHELDE	TOTAAL	
Vermindering belasting RWZI	2	19	37	1	59	stuks
Vispassages	18	143	437	37	635	stuks
Aanleg natuurvriendelijke oevers	108	604	1613	131	2456	km
Aanpak riooloverstorten	67/4	-/74	30/78	-	97/156	ha/stuks
Verwijderen verontreinigde bagger	-/15	325/1213	5350/2985	-/27	5675/4240	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ha
Inrichten mest-/sputvrije zone	-	102/362	849/18	-/23	951/403	ha/km
Actief vegetatie-/waterkwaliteitsbeheer	18/41	47/702	769/1273	26/-	860/2016	ha/km
Uitvoeren onderzoeksmaatregelen	9	199	848	13	1069	stuks

Slechts een zeer klein deel van de Nederlandse beken is als natuurlijk KRW-waterlichaam geclassificeerd. Dit geldt alleen voor de Roer, de Roode Beek, de Swalm, de Gulp, de Niers en het Merkske. Alle andere beken in Nederland behoren tot de categorie sterk veranderde waterlichamen. Voor een aantal van de sterk veranderde beken geldt dat zij na uitvoering van beekherstelmaatregelen op lange termijn de 'Goede Ecologische Toestand' kunnen benaderen.

---

De KRW is een motor voor beekherstel. Het National Waterplan (Ministerie van V&W, 2009) becijfert, dat in Nederland 2456 km oever opnieuw moet worden ingericht om te voldoen aan de ecologische kwaliteitsverbetering die de KRW voor deze waterlichamen vereist ([Tabel 1.2](#)). Een deel van deze opgave heeft betrekking op beekherstel. Morfologische aanpassingen van het beekprofiel zijn effectief gebleken voor verbetering van zowel de hydromorfologische en fysisch-chemische toestand van beken, alsook de biologische toestand. Hoewel de KRW zich uitsluitend richt op het aquatische deel van het beekstelsel, het beekdal valt buiten het KRW-aandachtsgebied, streven waterbeheerders ernaar om beekherstel integraal en beekdalbreed vorm te geven. De geomorfologische principes van beekherstel zijn daarvoor een goed uitgangspunt.

In het Nationaal Waterplan (Ministerie van V&W, 2009) wordt het bestaande WB21-en KRW-beleid in een concreet uitvoeringsprogramma voor de periode 2009-2015 voortgezet, en wordt tevens een langetermijnvisie én een streefbeeld voor 2040 met het oog op klimaatverandering gegeven. In het plan is een overzicht opgenomen van maatregelen die in de periode 2010-2015 moeten worden uitgevoerd in Nederland om aan de KRW-doelstellingen te voldoen. Voor vele honderden miljoenen moet volgens deze beleidsnotitie worden geïnvesteerd in beekherstel, aanleg van natuurvriendelijke oevers en het realiseren van vispasseerbare stuwen en gemalen. Uit de 'Ex ante evaluatie KRW' (Ligtvoet *et al.*, 2008) blijkt dat 'hermeandering' en de aanleg van natuurvriendelijke oevers kosteneffectieve maatregelen zijn om de doelen te halen. Ook wordt daarin gesteld dat met 'hermeandering' een grotere ecologische waarde wordt gecreëerd dan met natuurvriendelijke oevers. In het Nationaal Waterplan wordt geconstateerd dat grondverwerving in de praktijk een belemmerende factor vormt voor een voortvarende aanpak. Waar mogelijk dient gezocht te worden naar synergie met andere opgaven, bijvoorbeeld met betrekking tot wateroverlast en natuur.

---

## H2 THEORETISCH KADER

## 2.1 DE GEOMORFOLOGIE VAN BEKEN EN BEEKDALEN

Beken kunnen op basis van hydrologische, geomorfologische, ecologische en landschappelijke kenmerken, worden ingedeeld in verschillende typen met specifieke eigenschappen (Wolters *et al.*, 2001). Beek en beekdal of overstromingsvlakte vormen daarbij een eenheid. Bij de typering van beken kunnen verschillende schaalniveaus worden onderscheiden: (1) regio of landschap, (2) stroomgebied, (3) beek en (4) beektraject.

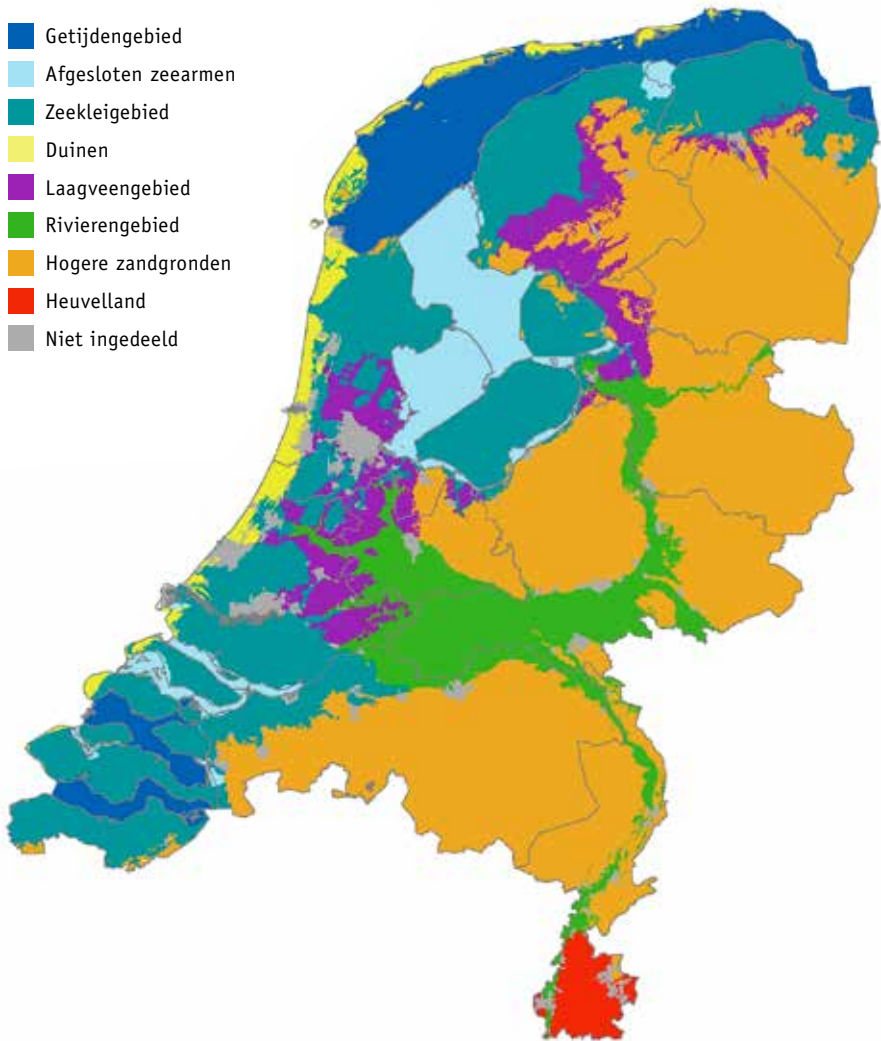
Het vertrekpunt van dit handboek geomorfologisch beekherstel is de regionale landschappelijke context waarin beken voorkomen. Het morfologisch, hydrologisch en ecologisch functioneren van beken is hiervan tot op het laagste schaalniveaus afhankelijk. Van bron tot monding kunnen beken verschillende landschappen passeren. Wel liggen stroomgebieden van beken meestal voor het grootste deel binnen één type landschap.

In Nederland zijn op macroschaal de onderstaande zeven landschappen of zogenaamde *fysisch-geografische regio's* te onderscheiden (Fig. 2.1).

- Hogere zandgronden
- Heuvelland
- Duinen
- Rivierengebied
- Laagveengebied
- Zeekleigebied
- Getijdengebied, inclusief afgesloten zeearmen

Beken en beekdalen komen in alle landschappen voor, behalve in het getijdenlandschap. De meeste beken liggen in de hogere zandgronden. Binnen de hogere zandgronden onderscheiden we drie sub-landschappen met verschillende typen beken: *stuwwalbeken*, *beken in het dekzandlandschap* en *terrasbeken*. *Stuwwalbeken* komen voor op de flanken van de stuwwallen van de Veluwe, Twente en Nijmegen. *Dekzandbeken* komen verspreid over het gehele dekzandgebied voor. Zoomen we nader op beken in het dekzandlandschap in, dan kunnen we daarbinnen nog een drietal sub-typen onderscheiden: (1) beken in een dal in het dekzandlandschap, (2) beken in een dal in het dekzandlandschap met een holocene fluviatiele dalvulling van zand en/of leem of klei en (3) beken in het dekzandlandschap in een met veen opgevuld dal.

Fig 2.1 FYSISCH-GEOGRAFISCHE REGIO'S



De beken in met veen opgevulde dalen lopen aan de randen van het Drents plateau door tot in het laagveengebied. De laatste categorie beken binnen de hogere zandgronden zijn de *terrasbeken*. Dit zijn beken die ontspringen op oude tektoni-

sche plateaus en fluviatiele terrassen, zoals de Peelhorst, het plateau van Winterswijk en de Maasterrassen. Van de terrasbeken die in de Maas uitmonden ligt de benedenloop binnen de fysisch-geografische regio rivierengebied. Een aparte categorie beken vormen de *heuvellandbeken* van Zuid-Limburg. Er worden in dit landschapstype geen sub-typen onderscheiden. Dit geldt ook voor de *beken in het zeeleigebied*. Deze komen alleen voor in West-Brabant als benedenloop van beken van de hogere zandgronden, zoals de Mark. Als laatste categorie kunnen beken in het duinlandschap worden onderscheiden, de *duinrellen*. Hiervan zijn geen goede voorbeelden meer aanwezig in Nederland.

De belangrijkste typen beken worden beschreven in [Bijlage 2](#). In deze bijlage wordt in [Tabel B2.1](#) de relatie gelegd tussen de landschappelijke beektypen en de hydrologische en ecologische typologieën van beken en verwante ecosystemen, die gemaakt zijn voor de Kaderrichtlijn Water en de Index Natuur en Landschap ([paragraaf 1.4](#)).

Stroomgebieden van beken en rivieren worden door Schumm (1977) in drie verschillende zones ingedeeld ([Fig. 2.2](#)). De beek is in deze benadering een systeem waarin, door een of meerdere geulen, water en sediment (grind, zand en klei) worden getransporteerd. In stroomafwaartse richting nemen de breedte en diepte van de beek toe. De geomorfologie van beek en beekdal is het resultaat van het soort sediment en de beschikbaarheid daarvan, de transportcapaciteit van de stroom en lokale kenmerken van het landschap (Nanson & Croke, 1992). De onderstaande zones worden daarbij onderscheiden.

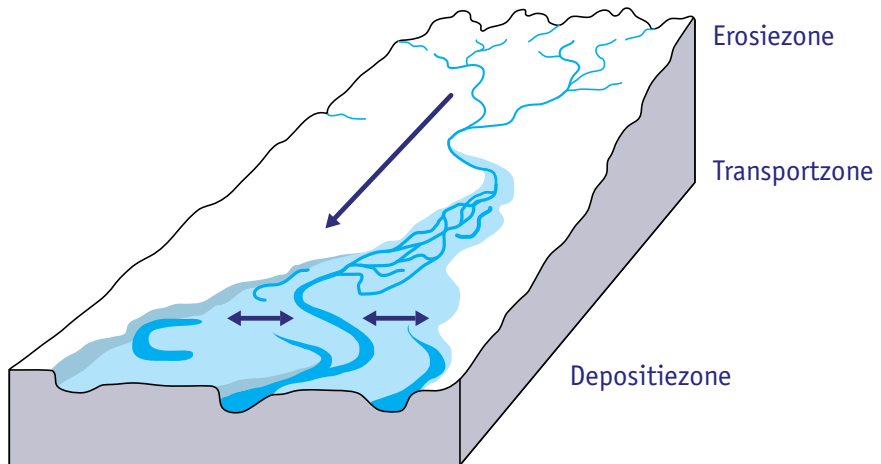
- *De erosiezone of bovenloop*: de relatief hooggelegen zone waarin door neerslag en vanuit bronnen een netwerk van kleine beken is ontstaan die samenvloeien tot een of meerdere grotere beken. In deze zone overheerst erosie.
- *De transportzone of middenloop*: de zone tussen de hoog- en laaggelegen zones in het stroomgebied, waarin doorvoer van water en erosieproducten (grind, zand en klei) plaatsvindt. Erosie en sedimentatie zijn in deze zone (min of meer) in evenwicht.
- *De depositiezone of benedenloop*: de laaggelegen zone waarin de erosieproducten worden afgezet. Netto wordt er in deze zone meer sediment afgezet dan er wordt geërodeerd. De depositiezone kan nog worden gesplitst in een zone die niet en een zone die wel door de zee (het getij) wordt beïnvloed.



---

**Fig 2.2 HET HYDROFLUVIATIELE SYSTEEM**

*Het hydrofluviaatiele systeem met relaties in drie dimensies in het rivierengebied (Petts & Amoros, 1996) en de stroomgebiedsindeling volgens Schumm (1977).*



---

Het is niet zo dat alle bovengenoemde zones in alle stroomgebieden van beken in gelijke mate voorkomen. Dit is onder andere afhankelijk van het type landschap. Daarnaast zijn stroomgebieden van beken vaak onderdeel van een groter stroomgebied. De depositiezone van een beekstelsel kan ontbreken omdat deze zich stroomafwaarts, in de komvlakte van een groter riviersysteem, bevindt. Ook kunnen de zones elkaar afwisselen. Nadat een beekdal zich heeft verbreed tot een overstromingsvlakte, waar sediment wordt afgezet, kan deze zich weer versmallen tot een beekdal waarin transport van sediment overheerst.

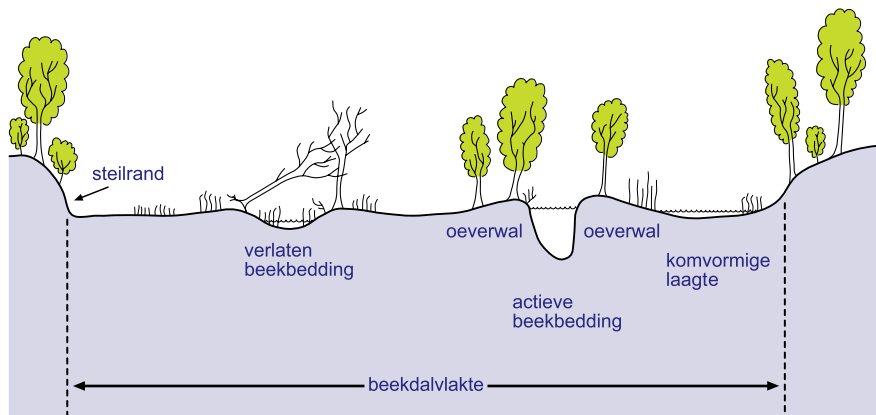
De geomorfologische opbouw van een natuurlijk beekdal in een dwarsdoorsnede geeft inzicht in de terreinvormen die in een beekdal naast elkaar kunnen voorkomen (Fig. 2.3).

De beekloop of geul vormt het hart van het beekstelsel. De geul kan op alle posities in het beekdal liggen, centraal in het dal, direct grenzend aan de dalflank of

tegen een steilrand. Het patroon van de geul varieert van recht tot sterk slingerend. Geulen liggen steeds in dezelfde positie of verplaatsen zich door meandervorming of plotselinge loopverlegging (avulsie) door het dal. Het dwarsprofiel van de geul is op rechte stukken min of meer symmetrisch en in de bochten asymmetrisch van vorm. In de geul kunnen banken van grind of zand voorkomen, die bij laagwater droogvallen. Er zijn banken die min of meer vastliggen en samenhangen met het patroon van de geul en banken die zich door de geul stroomafwaarts verplaatsen. In de lengterichting bestaat in de geul een patroon van afwisselend diepe kolkga-ten ('pools') en ondiepten in de bedding ('riffles').

**Fig 2.3 DWARSDOORSNEDE DOOR EEN BEEKDAL**

Dwarsdoorsnede door een beekdal met een overzicht van de belangrijkste terreinvormen: de beekdalvlakte, met daarin de actieve beekbedding, oeverwallen, een verlaten beekbedding en een komvormige laagte. Langs de linker dalflank markeert een steilrand de overgang naar de hogere gronden. De verticale schaal is overdreven om het reliëf te verduidelijken.



De oevers van beken zijn vrij steil en in de rechte delen van de geul min of meer loodrecht. In de buitenbocht, de stootoever, zijn de oevers loodrecht, concaaf of ondergraven. De binnenbocht, of glijoever, heeft doorgaans een flauwer oever- talud.

---

Op de oevers van de beek kunnen oeverwallen tot ontwikkeling komen (Fig. 2.4). Oeverwallen ontstaan als beken bij hoge afvoeren buiten hun oevers treden en beddingsediment, door een plotselinge afname van de transportcapaciteit van het water, op de oever wordt afgezet. Oeverwallen hogen langzaam op door herhaling van het proces op dezelfde plaats. Naar boven toe wordt de textuur van het sediment in de oeverwal vaak steeds fijner ('fining upward'). De helling van de oeverwal naar de beekzijde is steil, de helling naar de dalvlakte is flauwer.

De vorming van oeverwallen is afhankelijk van de transportcapaciteit van de beek, de beschikbaarheid van sediment, de breedte-diepte-verhouding van de geul en het patroon van de beek. Oeverwallen komen voor in de depositie- en de transportzone. Langs rechte beeklopen kunnen zij de geul als een vrijwel gesloten lint begeleiden, terwijl bij een slingerende geulloop oeverwalvorming meer lokaal, vaak in het eerste deel van de buitenbocht, optreedt (Fig. 2.4A). Ook bestaan er beektypen zonder oeverwallen.

Tussen de oeverwal en de hogere grond langs de rand van het beekdal ligt de beekdalvlakte. In deze vlakte kunnen restgeulen, geïsoleerde laagten en ruggen voorkomen, relictten van morfodynamische processen uit het verleden (Fig. 2.5). Hoe sterker de beek meanderde of hoe frequenter zij haar loop verlegde, hoe meer reliëf we in de beekdalvlakte aantreffen. In dalen van laag-dynamische beken ontbreekt dit reliëf en is de beekdalvlakte vlak of komvormig.

De overgang naar de hogere gronden langs de randen van het dal kan heel geleidelijk verlopen of abrupt zijn, zoals bij steilranden. Veelal is dit afhankelijk van het landschap waarin het beekdal zich bevindt. Dalen van insnijdende terrasbeken worden aan weerszijden geflankeerd door hoge steilranden, terwijl van beekdalen in veengebieden de overgang naar de hogere gronden soms nauwelijks waarneembaar is.

Het ondergraven van dalflanken is in een aantal beeksystemen dus nog een actief proces. In andere beekdalen verwijzen steilranden op de dalgrens naar geomorfologische processen die in het verleden onder volstrekt andere hydrologische/hydraulische condities hebben plaatsgevonden. Ook kunnen steilranden het gevolg van menselijk handelen zijn. Dekzandruggen grenzend aan het beekdal werden, bijvoorbeeld, vaak met plaggen opgehoogd, waardoor een steile scherpe grens tussen beekdal en hogere grond ontstond.

**Fig 2.4 OEVERWALVORMING LANGS DE DINKEL**

(A) Zand wordt uit de bedding van de geul op de oever afgezet in het eerste deel van de buitenbocht (voorgrond). Het tweede deel van de buitenbocht is een steiloever waar sediment wordt opgenomen dat stroomafwaarts weer wordt afgezet. (B) Vers afgezette zandlobben op de oeverwal. De dikte van de zandlobben bedraagt enkele centimeters.



**Fig 2.5 GEÏSOLEERDE LAAGTE IN DE DALVLAKTE VAN DE DINKEL**

Na een hoogwater blijft hier geruime tijd water staan.



---

## 2.2 STURENDE FACTOREN VOOR BEEKMORFOLOGIE

Over een los sedimentoppervlak stromend water heeft de neiging geulen uit te schuren op plaatsen waar de waterdiepte, en dus de uitschurende kracht, wat groter is dan in de omgeving. De geulvorming gaat door tot een evenwicht bereikt wordt en de geuldimensies constant blijven. De ligging van dit evenwicht wordt bepaald door: (1) de hoeveelheid water (en sediment) die de geul moet verwerken, (2) de helling van het oppervlak waarin de geul zich vormt, en (3) de aard van de ondergrond waarin de geul zich vormt.

De hoeveelheid water die een geul onder natuurlijke condities moet verwerken fluctueert over het jaar heen: bij hoge afvoeren zal de geul overlopen, terwijl bij lage afvoeren het water ver onder de geulranden blijft. Voor geomorfologisch beekherstel is het belangrijk de afvoer vast te stellen die bepalend is voor de natuurlijke dimensies van de beek in een evenwichtssituatie. Deze afvoer, die deel uitmaakt van een afvoerverdeling die de gemiddelde jaarlijkse variatie in afvoer beschrijft, wordt de *dominante* of *geulvormende afvoer* genoemd. Deze afvoer kan ook gezien worden als de afvoer die, gemiddeld over het jaar, het effectiefst is in het verplaatsen van sediment.

Hoge afvoeren kunnen weliswaar veel sediment verplaatsen, maar komen weinig voor en duren slechts kort zodat de totale hoeveelheid geomorfologisch werk die ze verzetten beperkt blijft. Lage afvoeren komen vaker en langduriger voor, maar verplaatsen weinig sediment. De dominante of geulvormende afvoer ligt ergens tussen de lage en hoge afvoeren in. Deze is hoog genoeg om een significante hoeveelheid sediment te verplaatsen en doet dit ook vaak en langdurig genoeg om over het jaar heen een optimaal netto geomorfologisch effect te sorteren. Het is belangrijk om te benadrukken dat de dominante of geulvormende afvoer een theoretisch concept is dat dient om de geomorfologische betekenis van een totale afvoerverdeling in één getal te vatten.

Er zijn verschillende manieren om de geulvormende afvoer te bepalen. Allereerst is er de morfologische methode, volgens welke deze afvoer gedefinieerd is als de *geulvullende afvoer* (bankfull discharge;  $Q_{bf}$ ), dat wil zeggen de afvoer die nog net door de geul verwerkt kan worden zonder dat deze overloopt. De gedachte achter deze definitie is dat onder natuurlijke condities bij geulvullende afvoer de verhouding tussen de breedte en de diepte van de stroming minimaal is. Er

is dan dus sprake van een grote stromingsdiepte, en dus een grote schuifspanning, in verhouding tot de breedte. Onder deze condities kan er veel sediment verplaatst worden per hoeveelheid water. Wanneer de geul overloopt gaat dat gepaard met een grote toename van de stromingsbreedte, maar slechts met een kleine toename van de stromingsdiepte. De sedimenttransportcondities worden dan dus minder gunstig.

Theoretisch is de geulvullende afvoer een goede benadering van de geulvormende afvoer. Het nadeel is echter dat dit alleen geldt voor geulen die zichzelf gevormd hebben op een overstromingsvlakte onder natuurlijke condities. Voor diep ingesneden geulen zonder overstromingsvlakte of voor sterk door mensen beïnvloede geulen zegt de geulvullende afvoer weinig over de dominante morfologische processen in de geul, omdat er dan doorgaans geen sprake is van een morfologisch evenwicht. Voor de praktijk van beekherstel, waarin we per definitie te maken hebben met sterk door mensen beïnvloede geulen, zijn dus andere methodes nodig om de geulvormende afvoer te schatten. Dit zijn hydrologische methodes die gebaseerd zijn op de gemiddelde jaarlijkse afvoerverdeling.

Er zijn drie hydrologische benaderingen van de geulvormende afvoer; de eerste is de gemiddelde jaarlijkse afvoer. Voor natuurlijke geulen valt die meestal wat lager uit dan de geulvullende afvoer en als zodanig is de gemiddelde jaarlijkse afvoer ( $Q_{ma}$ ) een onderschatting van de geulvormende afvoer. Een voordeel is dat de gemiddelde jaarlijkse afvoer een hydrologische waarde is die eenvoudig te bepalen is en daarom voor veel rivieren en beken beschikbaar is. De tweede hydrologische benadering van de geulvormende afvoer is de afvoer die statistisch een herhalings-tijd heeft van 1,58 jaar ( $Q_{1,58}$ ). Deze waarde benadert in feite de geulvullende afvoer zoals die onder natuurlijke condities voor een geul in evenwicht zou bestaan. Uit onderzoek van een groot aantal natuurlijke rivieren is gebleken dat de geulvullende afvoer gemiddeld overeenkomt met  $Q_{1,58}$ . De spreiding rond dit gemiddelde is echter groot, dus de geldigheid van deze benadering voor een Nederlandse beek is onbekend en het is niet gezegd dat zij beter is dan andere benaderingen. De derde benadering gaat uit van de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer ( $Q_{af}$ ) als benadering van de geulvormende afvoer. Ook deze waarde ligt doorgaans niet ver af van de geulvullende afvoer. Soms wordt ook de afvoer met een herhalings-tijd van 2 jaar ( $Q_{2,0}$ ) of 2,33 jaar ( $Q_{2,33}$ ) als representatieve piekafvoer voor geulvormende processen genomen.

---

De terreinhelling bepaalt mede de stroomsnelheid van het water en daarmee de aard en intensiteit van de geomorfologische processen. De algemene terreinhelling is doorgaans het product van een lange geomorfologische evolutie. Door erosie van andere terreinvormen zoals stuwwallen, dekzandruggen of rivierterrassen is in de loop van tienduizenden jaren, bijvoorbeeld een beekdal gevormd waarin de huidige beek haar weg zoekt. De huidige gradiënt van het beekdal is dan een op korte termijn onveranderlijke grootte voor de huidige beek. Door geomorfologische processen, zoals meanderen, kan de *geulhelling* van de beek lager zijn dan de algemene *dalhelling*. Het meanderproces is echter een gevolg van de oorspronkelijke condities, inclusief de terreinhelling, en daarom wordt in het algemeen de *dalhelling* en niet de *geulhelling* beschouwd als sturende factor voor beekmorfologie.

De aard en intensiteit van de geomorfologische processen hangen, behalve van de beekafvoer en het verhang, ook af van het type materiaal dat in de beekbedding voorkomt. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de, min of meer vlakke, bodem van de beek en de steilere oevers. De oevers van Nederlandse beken kunnen bestaan uit zand, klei of veen, afhankelijk van de geologische ontstaanswijze van het gebied en de processen in de beek. Een zandige oever kan ontstaan zijn door afzetting van de beek of door erosie van oudere zandlagen door de beek. Erosieve oevers kunnen ook in klei- of veenlagen gevormd worden. In het algemeen is zand makkelijk erodeerbaar en is klei, door haar cohesieve eigenschappen, moeilijk erodeerbaar. Veen is nog moeilijker erodeerbaar dan klei. Door de grote verschillen in erodeerbaarheid is het type oevermateriaal sterk bepalend voor de vorm en dynamiek van de beekbedding. Beddingen met venige of kleiige oevers zijn vaak relatief smal in verhouding tot hun diepte en kunnen zich moeilijk door erosie zijdelings verplaatsen. Beddingen met zandige oevers daarentegen, zijn vaak relatief breed in verhouding tot hun diepte en kunnen, bij voldoende stromingsenergie, makkelijker zijdelings bewegen. Oevererosie is een complex proces dat, behalve door de erosieve kracht van de stroming in de beek, ook bepaald wordt door massabewegingen waarbij min of meer intacte blokken oevermateriaal afschuiven en in de beek tuimelen. Dit proces is afhankelijk van wisselende waterstanden en de mate waarin de oever ondergraven raakt door de stroming. Grondwateruittreding (kwel) kan oevererosie vergemakkelijken. Organische stof en plantenwortels in de bovengrond daarentegen, kunnen de oever steviger maken.

In vergelijking met de geomorfologische processen langs de oever zijn de processen op de bodem eenduidiger en daarom beter te beschrijven. Op de bodem van Nederlandse beken ligt doorgaans zandig materiaal dat bij hogere afvoeren door de stroming wordt getransporteerd. De mate van transport van *beddingmateriaal* hangt, behalve van stromingsvariabelen, af van de korrelgrootte van het bedding-sediment. Er zijn allerlei sedimenttransportvergelijkingen die beschrijven hoeveel beddingmateriaal getransporteerd kan worden onder bepaalde stromingscondities. De mediaan van de korrelgrootteverdeling ( $D_{50}$ ) is een veelgebruikte parameter om het beddingmateriaal te karakteriseren. Hoe grover het beddingzand hoe meer stromingsenergie nodig is om het te verplaatsen.

De hoeveelheid beddingmateriaal die door de beek getransporteerd kan worden is in hoge mate sturend voor de vorm en het gedrag van de beekbedding. Als de beek het beddingmateriaal moeilijk kan verplaatsen, zal de bedding stabiel blijven. Als de beek het beddingmateriaal makkelijk kan verplaatsen zullen allerlei beddingvormen en banken ontstaan die de stroomdraad (de lijn waarlangs de hoogste stroomsnelheden voorkomen) van de beek op bepaalde plaatsen richting de oever duwen, waardoor lokaal erosie plaats kan gaan vinden. Lokale oevererosie gaat veelal gepaard gaan met rustiger condities aan de tegenoverliggende oever, waardoor daar afzetting van beddingmateriaal plaats kan gaan vinden. Op deze wijze kan de bedding zich zijdelings verplaatsen en kunnen bijvoorbeeld meanderbochten gevormd worden. Door deze relatie tussen oevererosie en mobiliteit van het beddingmateriaal wordt de  $D_{50}$  van het beddingmateriaal vaak genomen als een maat voor de invloed van de ondergrond op de geomorfologie van beken.

### 2.3 GEULPATRONEN

De geomorfologische variabiliteit van beken en rivieren is te vatten in een continuüm van geulpatronen, waarin *recht*, *meanderend* en *vlechtend* de basisvormen zijn (Fig. 2.6). Deze basisvormen lijken op alle schaalniveaus voor te komen. Tussen de basisvormen bestaan overgangsvormen en ook zijn basisvormen soms verder onder te verdelen. Grootschalige rivierpatronen zijn opgebouwd uit meerdere geulen die verschillende basisvormen kunnen hebben. Voorbeelden hiervan zijn zich stroomafwaarts vertakkende deltasystemen, of anastomoserende rivieren (Fig. 2.6) met zich vertakkende en weer samenkomende geulen die delen van de riviervlakte omsluiten. Voor de Nederlandse beken zijn vooral de drie basisvormen van belang. Deze zullen hieronder nader worden beschreven.



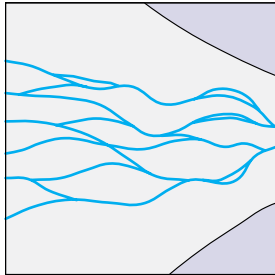
**Fig 2.6 INDELING VAN GEULPATRONEN**

De bovenste rij geeft de drie basisvormen weer, waarbij rechte en meanderende patronen worden gekenmerkt door één stroomdraad en vlechtende patronen door meerdere stroomdraden met tussenliggende banken. Daaronder is een anastomoserend geulpatroon weergegeven dat is samengesteld uit verschillende basisvormen (naar Makaske, 2001).

$B$  = Vlechtgeulratio       Komgebied  
 $P_{ind}$  = Sinuositeitsindex       Stroomgordel  
 Actieve geul

**EEN STROOMGORDEL**

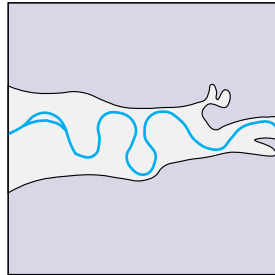
Meerdere stroomdraden



**Vlechtend**

$B > 1,5$

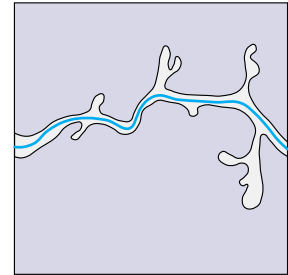
Eén stroomdraad



**Meanderend**

$B < 1,5$   
 $P_{ind} > 1,3$

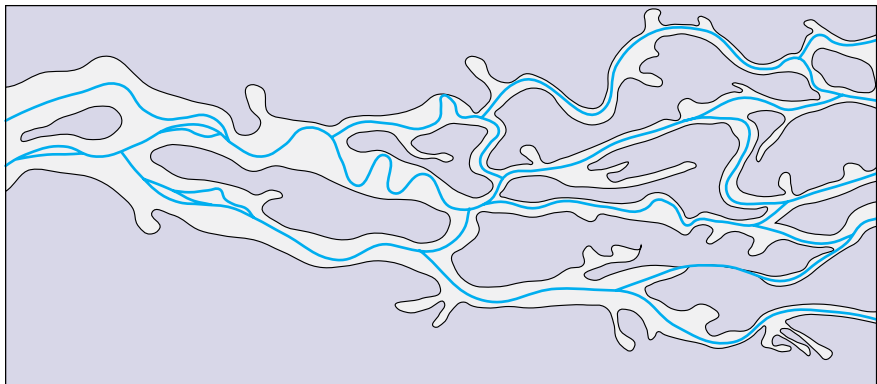
Eén stroomdraad



**Recht**

$B < 1,5$   
 $P_{ind} < 1,3$

**MEERDERE STROOMGORDELS**



**Anastomoserend**

Wanneer er weinig stromingsenergie beschikbaar is, ontstaan veelal geulen waarin onregelmatige bochten afgewisseld worden door vrij rechte stukken (Fig. 2.7). Door het ontbreken van regelmatige bochten worden deze geulen ook wel 'recht' genoemd, alhoewel deze naam ten onrechte de volledige afwezigheid van bochten suggereert. *Rechte geulen* zijn in het algemeen relatief smal en diep en hebben steile oevers die veelal gevormd zijn in cohesief (lemig, kleiig) sediment of in veen. Door de geringe stromingsenergie en de relatief stevige oevers ondergaan rechte geulen in de loop der tijd nauwelijks veranderingen in vorm. Rechte geulen komen vaak voor in anastomoserende geulenstelsels (Fig. 2.6). In rechte geulen komen nauwelijks banken voor. Grote beddingvormen, zoals megaribbels (paragraaf 2.8), kunnen wel voorkomen.

**Fig 2.7 RECHTE RIVER**

*Een rechte geul in de bovenloop van de Columbia River. Op de smalle oeverwallen groeien bomen, in de daarachter gelegen natte komgebieden groeit een korte grasachtige vegetatie (British Columbia, Canada).*



*Meanderende geulen* kenmerken zich door een regelmatig patroon van bochten (Fig. 2.8), die zich langzaam verplaatsen door oevererosie in de buitenbocht en aanwas in de binnenbocht. Basisvoorwaarde voor hun ontstaan is de beschikbaarheid van voldoende stromingsenergie voor oevererosie. Door geleidelijke bochtverplaatsing ontstaat in de binnenbocht een zogenoemde kronkelwaard, die zich vaak kenmerkt door een patroon van ruggen en geulen. De kronkelwaardruggen zijn banken die zich langs de binnenbocht gevormd hebben en markeren de verschillende

---

stadia van bochtvorming. De kronkelwaardgeulen zijn de restlaagtes tussen de banken. Meanderende geulen zijn gemiddeld breder en ondieper dan rechte geulen met een vergelijkbare afvoer. In de bochten is sprake van een asymmetrische dwarsdoorsnede met een steile oever in de buitenbocht en een geleidelijk oplopende oever in de binnenbocht. De geuldiepte is het grootst waar de kromming van de bocht het sterkst is en het kleinst tussen twee bochten in.

---

**Fig 2.8 MEANDERENDE RIVIER**

*Een meanderende rivier met het karakteristieke patroon van kronkelwaardruggen en -geulen ontstaan door aanwas in de binnenbocht (Paraguay-rivier, Brazilië).*



---

Naarmate een meanderbocht zich verder ontwikkelt neemt de kans op bochtafsnijding toe. Dit kan een meanderhalsafsnijding zijn, wanneer twee bochten door oevererosie met elkaar in contact komen, of een kronkelwaardgeulafsnijding, wanneer een kronkelwaardgeul erodeert bij hoogwater en de functie van de hoofdgeul overneemt. De mate van meanderen van een geul kan kwantitatief worden beschre-

ven door de *sinuositeit* (of kronkelfactor  $P$ ), die is gedefinieerd als de afstand langs de geul gedeeld door de afstand langs een rechte lijn. In plaats van de sinuositeit wordt ook wel de *sinuositeitsindex* ( $P_{\text{ind}}$ ) gebruikt, die is gedefinieerd als de afstand langs de geul gedeeld door de afstand langs de as van de meandergordel. De meandergordel is de strook waarbinnen de geul meandert. Omdat de meandergordel ook een bepaalde bochtigheid kan vertonen die niet te wijten is aan het meanderproces, is de sinuositeitsindex een betere maat voor meandervorming dan de sinuositeit.

Meanderende geulen zijn te verdelen in twee typen: (1) het sterk meanderende type met een hoge  $P$  of  $P_{\text{ind}}$  dat duidelijke kronkelwaardruggen en -geulen vormt en waarin halsafsnijdingen voorkomen, (2) het zwakker meanderende type waarin erosieve kronkelwaardgeulen gevormd worden die leiden tot bochtafsnijding. Het tweede type ontstaat bij hogere beschikbaarheid van stromingsenergie en kan beschouwd worden als een overgang naar het vlechtende geultype.

**Fig 2.9** VLECHTENDE RIVIER

*Vlechtende rivier met meerdere stroomdraden en grindbanken (Kicking Horse River, British Columbia, Canada).*



---

Een vlechtende geul wordt gekenmerkt door meerdere stroomdraden die worden gescheiden door zand- of grindbanken (Fig. 2.9). De stroomdraad is de lijn waarlangs de hoogste stroomsnelheden voorkomen. In meanderende en rechte geulen is doorgaans één stroomdraad aanwezig en neemt de stroomsnelheid in een dwarsdoorsnede aan weerszijden van de stroomdraad min of meer geleidelijk af naar de oever. In vlechtende geulen, daarentegen, bestaan meerdere pieken in stroomsnelheid in de dwarsdoorsnede en ontstaan banken tussen de stroomdraden. Deze banken kunnen langzaam groeien, waardoor de stroomdraden verder uit elkaar komen te liggen. Dit gaat gepaard met oevererosie. Voor het ontstaan van een vlechtend geulpatroon is een relatief hoog energieniveau van de stroming vereist. Wanneer de erosieve kracht van de stroming voor oevererosie onvoldoende is, blijft de geul te smal om plaats te bieden aan meerdere stroomdraden en banken in de geul. Vlechtende geulen zijn in vergelijking met meanderende geulen breed en ondiep en zeer dynamisch: patronen van banken en stroomdraden wijzigen snel in de tijd, onder invloed van piekafvoeren.

Om de mate van vlechten kwantitatief te beschrijven wordt soms de vlechtgeulratio ('braid-channel ratio'; B) gebruikt. B voor een bepaald bereik van de vlechtende geul is gedefinieerd als de som van de afstand langs alle stroomdraden in dat bereik, gedeeld door de afstand langs de dominante stroomdraad in dat bereik.

## 2.4 VERANDERINGEN IN GEULPATROON

Geulpatronen kunnen veranderen wanneer sturende factoren voor morfologie (paragraaf 2.2) veranderen. In sommige gevallen leidt een verandering in sturende factoren tot een kleine wijziging in geulpatroon, maar niet tot een ander type patroon. Zo kan bij een kleine verandering van de dominante afvoer de sinuositeit van een meanderende geul wat toe- of afnemen, zonder dat het geulpatroon verandert in vlechtend of recht. In andere gevallen echter, betekent een verandering in de sturende factoren een overgang naar een ander type patroon.

Geulpatronen (of morfologische geultypen) kunnen worden beschouwd als onderdeel van een continuüm, waarbinnen ieder geultype een bepaald bereik van sturende factoren vertegenwoordigt. Wanneer een geul zich midden in het bereik van een bepaald geultype bevindt leidt een kleine verandering in sturende factoren niet tot een ander geultype. Wanneer een geul zich echter aan de rand van het bereik van een bepaald geultype bevindt kan een vergelijkbare kleine verandering

in sturende factoren wel tot een overgang naar een ander geultype leiden.

Uit geologisch onderzoek is gebleken dat landschappelijke veranderingen in het verleden op grote schaal geleid hebben tot belangrijke veranderingen in rivierpatroon. Veranderingen in afvoer en sedimentlast aan het einde van de laatste ijstijd zorgden er in Nederland voor dat de Rijn en de Maas, die een vlechtend patroon hadden, gingen meanderen (zie bijvoorbeeld Makaske & Nap, 1995).

Er wordt al lang geomorfologisch onderzoek gedaan naar de grenzen tussen de bereiken voor geultypen in het continuüm. De bereiken en de grenzen daartussen worden bepaald door combinaties van sturende factoren. Zoals betoogd in [paragraaf 2.2](#) zijn er drie factoren die de morfologische toestand van een geul in evenwicht bepalen: (1) de dominante afvoer, (2) de terreinhelling, en (3) het sediment in de geul. Op basis van deze drie factoren zijn bereiken voor geultypen te definiëren. Wanneer de eerste twee factoren gecombineerd worden tot een energieparameter kan deze voor een bepaalde geul in een diagram uitgezet worden tegen een sedimentparameter die de derde factor vertegenwoordigt. Om nu de bereiken voor geultypen vast te stellen is dit gedaan voor een groot aantal geulen die onder min of meer natuurlijke condities in evenwicht verkeren (sedimentaansvoer en sedimentafvoer zijn gelijk) en waarvan de morfologie (recht, meanderend of vlechtend) bekend is. Op deze wijze ontstaat een zogenoemd stabiliteitsdiagram waarin te zien is dat verschillende geultypen zich concentreren in verschillende velden van het diagram, die ieder zijn op te vatten als het karakteristieke bereik van een bepaald geultype.

Een geschikte energieparameter voor stabiliteitsdiagrammen is het *potentiële specifieke stromingsvermogen* ( $\omega_{pv}$ ; in  $W/m^2$ ), dat is gedefinieerd als:

$$\omega_{pv} = \rho g Q S_v / W_r \quad (1)$$

waarin

- $\rho$  = dichtheid van water ( $kg/m^3$ );
- $g$  = zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ );
- $Q$  = dominante of geulvormende afvoer ( $m^3/s$ );
- $S_v$  = helling van dal of vlakte (-);
- $W_r$  = breedte van een referentiegeul (m).

---

Als dominante afvoer wordt vaak de geulvullende afvoer ( $Q_{bf}$ ) of, als deze niet beschikbaar is, de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer ( $Q_{af}$ ) genomen (zie [paragraaf 2.2](#)). Omdat voor geulvormende processen het vermogen per oppervlakte-eenheid van belang is, moet het product van afvoer en helling gedeeld worden door de geulbreedte. Aangezien deze laatste afhankelijk is van het geultype (vlechtende geulen zijn relatief breed, rechte geulen zijn relatief smal; [paragraaf 2.3](#)) is ervoor gekozen om te delen door de breedte van een referentiegeul. Dit is een theoretische geulbreedte die onafhankelijk is van het geultype. De breedte van deze referentiegeul is gedefinieerd als

$$W_r = 4.7 \sqrt{Q} \quad (2a)$$

voor geulen met zandig beddingmateriaal ( $D_{50} < 2$  mm), en als

$$W_r = 3.0 \sqrt{Q} \quad (2b)$$

voor geulen met grindig beddingmateriaal ( $D_{50} > 2$  mm).

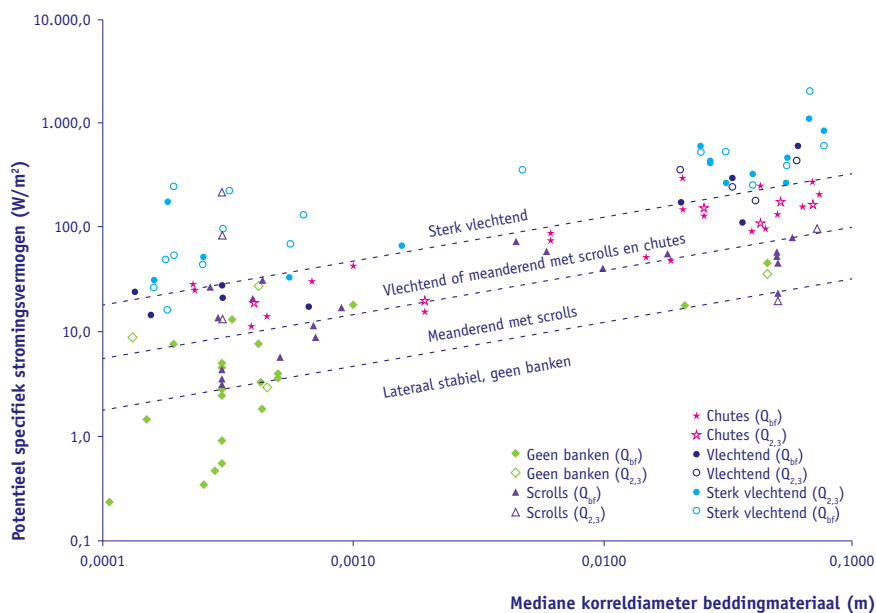
Het potentiële specifieke stromingsvermogen is een virtuele grootte, die vrijwel altijd afwijkt van het werkelijke specifieke stromingsvermogen in een geul. Alleen wanneer de geulhelling gelijk is aan  $S_v$  en de geulbreedte gelijk is aan de breedte van de referentiegeul, komt het potentiële specifieke stromingsvermogen overeen met het werkelijke specifieke stromingsvermogen. De toevoeging 'specifieke' verwijst naar het feit dat het stromingsvermogen uitgedrukt wordt per oppervlakte-eenheid door te delen door geulbreedte.

In [Figuur 2.10](#) is voor een groot aantal geulen het potentiële specifieke stromingsvermogen uitgezet tegen de mediaan van de korrelgrootteverdeling van het beddingmateriaal ( $D_{50}$ ). Op basis van de clustering van bepaalde geultypen in het diagram zijn vier velden (bereiken) te onderscheiden. Onderin het diagram vinden we de rechte geulen. Daarboven ligt een veld waarin we de meanderende geulen met duidelijke patronen van kronkelwaardruggen en -geulen vinden. Daarboven ligt het veld van de meanderende geulen met erosieve kronkelwaardgeulen ('chutes') en daar weer boven vinden we het veld van de vlechtende geulen. De scheidingslijnen die in het diagram getrokken kunnen worden tussen de velden lopen schuin omhoog naar rechts. Dit houdt in dat bij toenemende korrelgrootte van het bed-

dingmateriaal er meer vermogen nodig is om het ene geultype over te laten gaan in het andere; grote korrels laten zich immers lastiger verplaatsen dan kleine. Er dus meer vermogen nodig om in grof materiaal een bepaalde vorm te creëren.

**Fig 2.10** STABILITEITSDIAGRAM VOOR MORFOLOGISCHE GEULTYPEN

Stabiliteitsdiagram waarin voor verschillende geultypen het potentiële specifieke stromingsvermogen is uitgezet tegen de mediaan van de korrelgrootte van het beddingmateriaal. De diagonale lijnen markeren de overgangen tussen de verschillende geultypen (data van Kleinhans & Van den Berg, 2011, en Makaske et al., in voorbereiding).



De scheidingslijnen tussen de velden zijn geen harde grenzen, maar moeten opgevat worden als het midden van de overgangszones tussen de verschillende velden. Verder is gebleken dat de scheidingslijnen vooral gezien moeten worden als benaderingen van de ondergrens voor het voorkomen van een bepaald geultype. Dit houdt bijvoorbeeld in dat er maar een kleine kans is dat meanderende geulen onder de onderste scheidingslijn plotten, maar dat het wel zou kunnen dat een



---

aantal rechte geulen in het veld van de meanderende geulen plot. De achtergrond hiervan is dat de processen van bankvorming en oevererosie die leiden tot meandervorming een vrij scherp gedefinieerd minimum energieniveau vereisen, waaronder meandervorming fysisch onmogelijk is. Omgekeerd kunnen er wel situaties zijn waarin een energieniveau boven dit minimum niet leidt tot meandervormende processen. Het gaat dan om specifieke condities die niet vertegenwoordigd zijn in het stabiliteitsdiagram, zoals het voorkomen van verkittete lagen in de oever waardoor oevererosie bemoeilijkt wordt.

Ondanks bovengenoemde onzekerheden geven stabiliteitsdiagrammen, zoals die van [Figuur 2.10](#), een inzicht in de bereiken van sturende factoren die horen bij een bepaald geultype. Om deze reden kunnen ze gebruikt worden om te voorspellen welke veranderingen in geulpatroon op kunnen treden als gevolg van een verandering in sturende factoren of wanneer de menselijke invloed op het geulpatroon wordt teruggebracht, zoals in het geval van geomorfologisch beekherstel.

## 2.5 HYDRAULISCHE GEOMETRIE EN MEANDERGEOMETRIE

Voor het berekenen van de dimensies van de dwarsdoorsnede (breedte en diepte) van geulen in een evenwichtssituatie zijn hydraulische-geometrie-relaties ontwikkeld. Dit zijn empirische vergelijkingen die breedte en diepte via een exponentiële functie relateren aan de afvoer. In een complete set hydraulische-geometrie-vergelijkingen (zie bijvoorbeeld Leopold & Maddock, 1953) is doorgaans ook een vergelijking opgenomen die de gemiddelde stroomsnelheid in een geul koppelt aan de afvoer. Deze relatie zal hieronder buiten beschouwing worden gelaten.

In het algemeen hebben hydraulische-geometrie-vergelijkingen de volgende vorm:

$$W = a Q^b \quad (3)$$

$$D = c Q^f \quad (4)$$

waarin

$W$  = geulbreedte (m);

$D$  = gemiddelde geuldiepte (m);

$Q$  = dominante of geulvormende afvoer ( $m^3/s$ );

$a, c$  = te bepalen coëfficiënten;

$b, f$  = te bepalen exponenten.

Strikt genomen zijn hydraulische-geometrie-vergelijkingen slechts geldig binnen sets van rivieren en beken waarvoor homogene condities (met betrekking tot klimaat, ondergrond en vegetatie) gelden. De coëfficiënten  $a$  en  $c$ , en de exponenten  $b$  en  $f$  zouden dus gecalibreerd moeten worden voor gebruik voor Nederlandse beken. Uit vele onderzoeken wereldwijd is naar voren gekomen dat de variatie in de exponenten  $b$  en  $f$  beperkt is. Meestal geldt:  $b = 0,5$  en  $f = 0,4$ . Deze waardes zullen hieronder als vast beschouwd worden.

De coëfficiënt  $a$  in de vergelijking voor de breedte varieert aanzienlijk, vooral afhankelijk van sedimentkarakteristieken en de mate van oeverbegroeiing. Voor rivieren en beken met een *zandige bedding* ligt  $a$  doorgaans tussen 3,5 en 6,5, met een gemiddelde van 4,9 (Soar & Thorne, 2001). Van den Berg (1995) ging voor de berekening van de referentiebreedte van zandige beddingen ten behoeve van de berekening van het potentiële specifieke stromingsvermogen uit van  $a = 4,7$  (paragraaf 2.4). Op basis van Knighton (1987) gebruikte Hobo (2006) voor het inschatten van de breedte van de herstellende Overijsselse Vecht een waarde van 5,62 bij zandige oevers en een waarde van 4 bij cohesieve (kleiige/lemige) oevers.

Voor *grindige beddingen* gelden relatief lage waardes van  $a$ . Van den Berg (1995) ging uit van  $a = 3,0$  voor de berekening van de referentiebreedte (paragraaf 2.4). In een literatuuroverzicht geven Anderson *et al.* (2004) waardes van 1,80 tot 4,33. Hey & Thorne (1986) onderzochten de variatie van  $a$  als functie van de oeverbegroeiing voor geulen met een grindbedding en kwamen tot de volgende reeks:

- $a = 4,33$  bij grasachtige oevers;
- $a = 3,33$  bij oevers met 1-5% bedekking met bomen en struiken;
- $a = 2,73$  bij oevers met 5-50% bedekking met bomen en struiken;
- $a = 2,34$  bij oevers met >50% bedekking met bomen en struiken.

Samenvattend kan gesteld worden dat geulen in onbegroeid zandig sediment het breedst zullen zijn en dat een grindige bedding, een dichte oevervegetatie en een hoog aandeel van cohesief sediment in het oevermateriaal de geulbreedte beperken. Voor Nederlandse beken zal in het algemeen een relatief lage waarde van coëfficiënt  $a$  van toepassing zijn, gezien de invloed van oevervegetatie en het frequent voorkomen van lemige, venige en verkitte bodemlagen in de oever.

Voor het inschatten van de diepte van geulen met een hydraulische-geometrie-

vergelijking moet coëfficiënt  $c$  bepaald worden. Knighton (1987) geeft waarden van 0,54 voor zandige oevers en 0,58 voor cohesieve oevers, bij een exponent  $f$  van 0,4. Deze waarden zijn door Hobo (2006) gebruikt om de diepte van de herstelde Overijsselse Vecht te voorspellen.

De inschatting van de diepte met een hydraulische-geometrie-vergelijking is minder nauwkeurig dan inschatting van de breedte. De mate van insnijding van een geul is afhankelijk van een groot aantal variabelen, waaronder de geulgradiënt, de aard van de ondergrond en het sedimentaanbod. Voor een bepaalde afvoer en breedte zijn meerdere combinaties van gradiënt en diepte mogelijk. Bij een hogere sinusiteit, en dus een lagere gradiënt, hoort een diepere geul dan bij een lagere sinusiteit. De extra factoren die van invloed zijn op de diepte van een geul worden in een hydraulische-geometrie-vergelijking onvoldoende meegewogen. Een betere inschatting van de diepte kan gemaakt worden met de volgende empirische vergelijking van Brownlie (1983), waarin geulhelling en sedimentkarakteristieken wel worden betrokken:

$$R = S^{0,2542} 0,3724 D_{50} Q^{0,6539} \sigma_s^{0,1050} \quad (5)$$

waarin

- $R$  = hydraulische straal (m);  
 $S$  = geulgradiënt (-);  
 $Q$  = dimensieloze afvoer, gedefinieerd als  $Q/(W g^{0,5} D_{50}^{1,5})$ ;  
 $W$  = geulbreedte (m);  
 $g$  = zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ );  
 $\sigma_s$  = sortering van het beddingmateriaal, gedefinieerd als  $\frac{1}{2}(D_{50}/D_{16} + D_{84}/D_{50})$ ;  
 $D_{16}, D_{50}, D_{84}$  = korrelgroottes in een korrelgrootteverdeling waarvoor, respectievelijk 16, 50 en 84 gewichtspercenten, kleiner zijn (m).

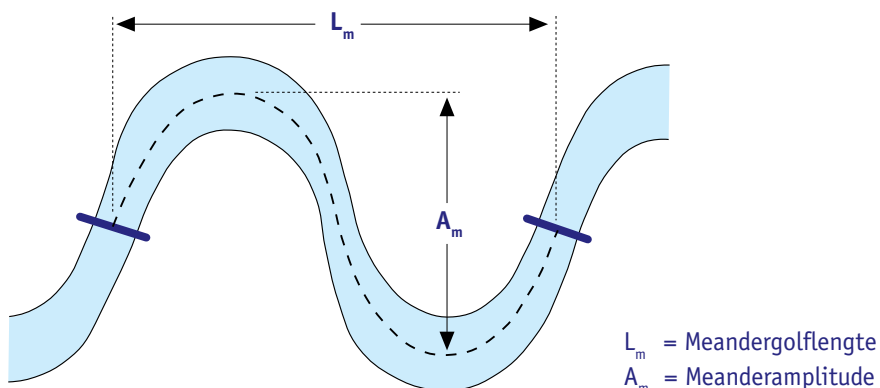
De hydraulische straal is de verhouding ( $A/O$ ) tussen het doorstroomoppervlak ( $A$ ) en de natte geulomtrek ( $O$ ) in een dwarsdoorsnede van de geul. Voor natuurlijke geulen, waarvan de breedte veel groter is dan de diepte, benadert de hydraulische straal de gemiddelde geuldiepte. De vergelijking van Brownlie geldt voor de stromingscondities, korrelgroottes, en gradiënten zoals die in beken voorkomen en is opgesteld op basis van een grote dataset van veld- en laboratoriumgegevens.

Een nadeel voor toepassing van deze vergelijking in de praktijk van beekherstel in Nederland is dat de toekomstige sinuositeit, en dus de geulgradiënt, van de herstelde beek niet altijd precies bekend is. Ook vraagt toepassing van de vergelijking gedetailleerde gegevens over de korrelgrootteverdeling van het beddingsediment. Hiervoor zullen voldoende representatieve sedimentmonsters in het laboratorium moeten worden geanalyseerd.

Voor meanderende geulen bestaan empirische relaties die de afmetingen van de meanders beschrijven als functie van de breedte van de bedding en de afvoer. Praktische grootheden voor gebruik in beekherstel zijn de meandergolflengte ( $L_m$ ) en de meanderamplitude ( $A_m$ ) (Fig. 2.11). Toepassing van de empirische relaties is alleen zinnig wanneer er sprake is van een actief proces van bochtvorming. Voor geulen die te weinig stromingsvermogen hebben om zelf bochten te vormen door oevererosie in de buitenbocht en sedimentafzetting in de binnenbocht zijn de empirische relaties ongeldig, ook al vertonen deze geulen een (stabiel) bochtenpatroon. De meanderpotenties bij beekherstel kunnen onderzocht worden met behulp van het stabiliteitsdiagram in Figuur 2.10.

**Fig** MORFOLOGISCHE VARIABLEN

**2.11** De morfologische variabelen die de geometrie van een meanderbocht beschrijven.



---

In de loop der tijd heeft een aantal onderzoekers een relatie gelegd tussen de geulbreedte en de meandergolflengte. Enkele bekende relaties zijn:

$$L_m = 11,0W^{1,01} \quad (\text{Leopold \& Wolman, 1960}) \quad (6a)$$

$$L_m = 12,6W \quad (\text{Carlston, 1965}) \quad (6b)$$

$$L_m = 7,5W^{1,12} \quad (\text{Williams, 1986}) \quad (6c)$$

$$L_m = 10,23W \quad (\text{Soar \& Thorne, 2001}) \quad (6d)$$

waarin

$L_m$  = meandergolflengte (m);

$W$  = geulbreedte (m).

De beperkte variatie van de coëfficiënt waarmee de breedte vermenigvuldigd wordt suggereert een redelijke betrouwbaarheid. Wanneer echter de breedte in eerste instantie onbekend is en via een hydraulische-geometrie-vergelijking moet worden ingeschat, wordt de ene onnauwkeurigheid op de andere gestapeld. Dit is een nadeel van deze relaties voor ontwerp-toepassingen in beekherstel.

Er bestaan ook empirische relaties tussen afvoer en meandergolflengte, zoals:

$$L_m = 166,6Q_{ma}^{0,46} \quad (\text{Carlston, 1960 in Soar \& Thorn, 2001}) \quad (7)$$

waarin

$L_m$  = meandergolflengte (m);

$Q_{ma}$  = gemiddelde jaarlijkse afvoer ( $m^3/s$ ).

Het verband tussen afvoer en meandergolflengte is minder direct dan tussen geulbreedte en meandergolflengte. Geulbreedte en meandergolflengte zijn beide afhankelijk van oeverprocessen die, behalve door de afvoer, ook bepaald worden door vegetatie en materiaaleigenschappen van bedding en oever. Net als de breedte laat de meandergolflengte zich dus maar ten dele voorspellen op basis van alleen een afvoer. De werkelijke meandergolflengtes kunnen daarom relatief grote afwijkingen vertonen ten opzichte van die berekend op basis van de afvoer. Omdat in hydraulische-geometrie-vergelijkingen vegetatie en materiaaleigenschappen tot op zekere hoogte meegewogen kunnen worden in het berekenen van de breedte, lijkt het beter om de meandergolflengte op basis van de geulbreedte te voorspellen dan direct op basis van de afvoer.

De meanderamplitude is een voor planning van beekherstel zeer relevante grootte, omdat zij in hoge mate bepalend is voor het ruimtebeslag van een herstelde meanderende beek. Voor de meanderamplitude geldt de vuistregel dat deze ongeveer 0,5 tot 1,5 maal de meandergolfenlengte is (USACE, 1994). Dit betekent dat de relaties tussen meandergolfenlengte en geulbreedte bij benadering ook gelden voor de meanderamplitude. De volgende twee vergelijkingen geven een vertaling van bovenstaande vuistregel naar de relatie tussen geulbreedte en meanderamplitude:

$$A_m = 3,0W^{1,1} \quad (\text{Leopold \& Wolman, 1960}) \quad (8a)$$

$$A_m = 17,6W \quad (\text{Carlston, 1965 in Soar \& Thorn, 2001}) \quad (8b)$$

waarin

$A_m$  = meanderamplitude (m);

$W$  = geulbreedte (m).

Samenvattend kan gesteld worden dat voor geulontwerp een goede inschatting van de geulbreedte, middels een goed op de lokale situatie toegesneden hydraulische-geometrie-vergelijking, cruciaal is. Hiervan kan, indien van toepassing, een inschatting van de meandergeometrie worden afgeleid. De gemiddelde geuldiepte kan het nauwkeurigste met de empirische vergelijking van Brownlie (1983) worden berekend, waarbij de via de hydraulische-geometrie-vergelijking verkregen breedte als invoer wordt gebruikt.

## 2.6 OEVERONTWIKKELING

Natuurlijke oevers van beken en rivieren kunnen in drie toestanden verkeren: (1) de erosieve toestand (Fig. 2.12, links), (2) de aanwastoestand (Fig. 2.12, rechts) en (3) de evenwichtstoestand. De laatste komt in de praktijk weinig voor, er is altijd wel sprake van langzame erosie of aanwas. Langs een meanderende geul wisselen erosieve oevers in de buitenbocht en aanwassende oevers in de binnenbocht zich af, waardoor de geul zich langzaam verplaatst en bochten zich uitbouwen. Langs vlechtende geulen worden de locaties van oevererosie en -aanwas bepaald door de vorming van banken die de stroomdraad naar de oever of juist van de oever af duwen. Omdat deze banken in het algemeen dynamisch zijn wisselen op één locatie oevererosie en oeveraanwas zich regelmatig af in de tijd. In rechte geulen is een systematische afwisseling van oevererosie en -aanwas in ruimte en tijd afwezig en zijn beide vaak langzame processen. Lange periodes van dominante oeveraan-

---

was tijdens relatief lage afvoeren, die ervoor zorgen dat afvoercapaciteit van de geul langzaam afneemt, kunnen overgaan in grootschalige oevererosie wanneer de geul hogere afvoeren moet verwerken. Oeverontwikkeling kan in rechte geulen dus een cyclisch proces van opbouw en afbraak zijn, waarin een belangrijke rol is weggelegd voor de oevervegetatie die stabiliserend werkt op een erosieve oever omdat wortels het oevermateriaal binden, en die aanwas kan bevorderen door remming van de stroming en het invangen van sediment.

---

**Fig**

**2.12**

### **RIVIEROEVERS**

*Een steile erosieve (links) en een flauw hellende aanwassende (rechts) rivieroever.*



---

Oevererosie langs beken en rivieren is een complex proces, omdat er verschillende mechanismen aan ten grondslag liggen. De vier belangrijkste mechanismen, die zijn geïllustreerd in [Figuur 2.13](#), zijn:

- A afschuiving langs een recht schuifvlak;
- B afschuiving langs een cirkelvormig schuifvlak;
- C ondergraving en bezwijking van overhangende oevers;
- D kwel-gerelateerde oeverbezwijking.

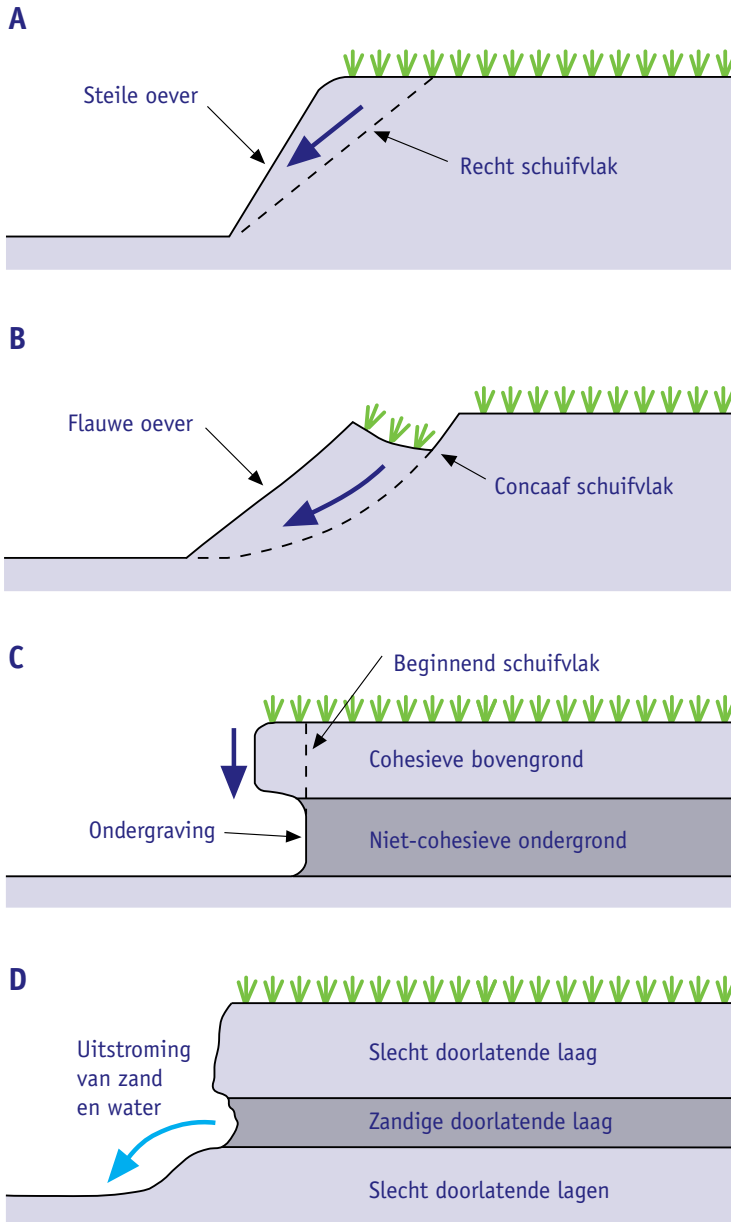
Onafhankelijk van het type mechanisme bepaalt de sedimenttransportcapaciteit van de stroming of en hoe vaak een bepaald mechanisme daadwerkelijk tot terugtrekken van de oever zal leiden. Alle mechanismen leiden tot stapsgewijze terugtrekking van de oever, waarbij per stap een bepaalde hoeveelheid oevermateriaal ineens in de beek of rivier terecht komt. Dit materiaal blijft in eerste instantie aan de voet van de oever liggen op de bodem van de geul, als een soort voethelling die beschermend en stabiliserend werkt op de oever. Doorgaans kan de oever pas opnieuw bezwijken als dit materiaal door de stroming is opgeruimd. Het bezwijken van oevers gebeurt vaak bij een dalende waterspiegel na hoge afvoer, wanneer de tegendruk van het water in de geul op het met water verzadigde oevermateriaal wegvalt. Ook zorgt de waterverzadiging voor een verlaging van de weerstand langs het afschuifvlak.

Welke mechanismen van oevererosie van toepassing zijn hangt af van: (1) de hoogte van de oever, (2) de helling van de oever, (3) het oevermateriaal en de eventuele gelaagdheid daarvan, (4) de erosieve kracht van de stroming, (5) het al dan niet voorkomen van uittredend grondwater en (6) de aard en dichtheid van oevervegetatie. De mechanismen A en B vereisen oeverhoogtes van minimaal 2 tot 3 m en zijn in de praktijk voor Nederlandse beken niet van toepassing. Mechanisme C is waarschijnlijk dominant over aanzienlijke lengtes vrij eroderende oevers van Nederlandse beken (zie bijvoorbeeld Wolfert, 2001), terwijl mechanisme D meer lokaal van toepassing is.

Mechanisme C is van toepassing op steile, gelaagde oevers, waarin een zandige onderlaag afgedekt wordt door een meer samenhangende, eventueel cohesieve, bovengrond (Wolfert, 2001). In zandgebieden geven humushoudende bodemhorizonten samenhang aan de bovengrond (zie bijvoorbeeld Fig. 2.14), terwijl de humusarme zandige ondergrond relatief makkelijk erodeerbaar is. Ook plantenwortels binden de bovengrond. Naarmate het zand meer leem bevat neemt de erodeerbaarheid af. In gebieden waar een kleiige of venige laag op een zandondergrond ligt is de dikte hiervan, ten opzichte van de geuldiepte, sterk bepalend voor de erodeerbaarheid van de oevers. Wanneer oevers voor meer dan 50% van hun hoogte uit een slecht erodeerbare bovengrond bestaan neemt de effectiviteit van het ondergravingsmechanisme sterk af. Langs beken met begroeide oevers in een dik klei- of veenpakket is oevererosie zeer gering, waarbij veen nog resistenter tegen erosie is dan klei. Ook grindbanken in oevers zijn doorgaans relatief slecht erodeerbaar.



**Fig 2.13** **VIER VERSCHILLENDE MECHANISMEN VAN OEVEREROSIE**  
(FISRWG, 1998).



**Fig** **LOKALE OEVEREROSIE LANGS EEN BEEK****2.14**

Grove verkitte brokken van het geërodeerde bodemprofiel blijven achter op de voethelling. Links is te zien hoe de voethelling begroeid raakt.



In de oever uittredende kwel kan zand opwoelen en in transport brengen en daardoor oevererosie teweeg brengen (mechanisme D). Eekhout *et al.* (2013) lieten zien dat meanderbochten in een beek geïnitieerd kunnen worden door lokale kwel. Ook Wolfert (2001) noemt dit als mechanisme van oevererosie langs beken. Vaak komen mechanismen C en D gecombineerd voor en wordt ondergraving van de oever versterkt door kwel.

De erosie van gelaagde oevers is te beschrijven door grondmechanische vergelijkingen voor afschuiving van blokken oevermateriaal te koppelen aan sedimenttransportvergelijkingen die de afvoer van het oevermateriaal in de geul beschrijven. Een bekend oevererosiemodel is het Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) van de USDA.

Langs beken is de invloed van vegetatie op de oeverontwikkeling veel groter dan langs rivieren. Door de geringe diepte van beken beslaat de goed doorwortelde bovengrond een relatief groot deel van de totale oeverhoogte. Onder gunstige condities kunnen bomen tot ca. 130 cm diepte wortelen, waardoor de oever van, bijvoorbeeld, een 1,5 m diepe beek in een bos goed beschermd kan zijn tegen erosie. Door

de vaak geringe stroomsnelheden kan zich in beken relatief makkelijk vegetatie op de oever vestigen die sediment kan invangen. Door de lage stroomsnelheden is de sedimenttransportcapaciteit beperkt en kan het vrij lang duren voordat het materiaal, dat door afschuiving aan de voet van de oever terecht is gekomen, is opgeruimd. Als bijvoorbeeld afvoerpieken een tijdje uitblijven, kan de voethelling begroeid raken en sediment in gaan vangen. Op deze wijze kan de voethelling zich ontwikkelen tot een bank die de steile oever beschermt en op den duur volledig bedekt. Wanneer weer een periode van erosie aanbreekt, kan de cyclus van afbraak en opbouw zich herhalen (Fig. 2.15).

**Fig 2.15 OEVERONTWIKKELING LANGS DE DOMMEL ALS CYCLISCH PROCES**

*Linksboven: Oevererosie door ondergraving en afschuiving van de bovengrond. Rechtsboven: groei van een bank voor de steiloever; de oeverbegroeiing van riet vangt veel zand en organisch materiaal in. Rechtsonder: de bank groeit verder tot oeverwalniveau. Links onder: scheuren verraden instabiliteit van de zandige oever; delen beginnen af te schuiven (achtergrond).*



Met welke erosiesnelheden langs onbeschermd oeveren van Nederlandse beken moet rekening gehouden worden? De gemeten snelheden van oevererosie langs beken lopen sterk uiteen. Wolfert (2001) mat snelheden van oevererosie in twee bochten van drie herstelde beken, als onderdeel van een monitoringsprogramma dat ongeveer twee jaar duurde. Hij rapporteerde maximumsnelheden van 0,87 m/jaar in één van de herstelde bochten van de Tongelreep. In de andere gemonitorde bocht van de Tongelreep was de maximale erosiesnelheid echter veel lager: 0,22 m/jaar. Langs de Keersop werd maar in één van de twee bochten significante oevererosie vastgesteld: 0,17 m/jaar. Langs de Aa bleven de oeveren in beide bochten stabiel. De eerste geulvullende afvoer na herstel zorgde voor de meeste geomorfologische activiteit in de Tongelreep en Keersop, waarna de erosie geleidelijk afnam. De gemeten oevererosiesnelheden zijn niet representatief voor een situatie van morfologisch evenwicht en het lijkt onwaarschijnlijk dat de Tongelreep en de Keersop op langere termijn actief zullen meanderen. Historische gegevens van geulverplaatsing van kleine meanderende rivieren wijzen op oevererosiesnelheden van 0,11 tot 0,4 m/jaar (Dinkel) en 0,46 tot 0,55 m/jaar (Overijsselse Vecht) (Wolfert, 2001).

Al met al geldt dat er verschillende redenen zijn waarom oevererosie langs kleine waterlopen, zoals beken, van nature een beperkt proces is. Ten eerste zijn niet alle mechanismen van oevererosie langs beken mogelijk, door de beperkte hoogte van de oeveren. Ten tweede maakt de vaak relatief lastig te eroderen bovengrond (met plantwortels en bodemhorizonten met een hoog gehalte aan organische stof) langs beken een relatief groot deel van de totale oeverhoogte uit. Ten derde is de sedimenttransportcapaciteit van beken beperkt door de relatief lage stroomsnelheden, waardoor oevermateriaal dat in de beek stort maar langzaam wordt opgeruimd en eventueel begroeid kan raken. Langs beken kan het daarom voorkomen dat oeverafzetting over lange periodes het proces van erosie overtreft. Er zijn echter maar weinig studies die de oeverontwikkeling van beken over een langere termijn kwantitatief beschrijven.

## 2.7 HYDRAULICA EN SEDIMENTTRANSPORT

Alle geomorfologische processen in beken en rivieren worden bepaald door de mate waarin het stromende water sediment kan transporteren. Hoe groter de sedimenttransportcapaciteit, hoe groter de geomorfologische dynamiek in en langs de beek. Als een beek veel sediment kan transporteren raakt bijvoorbeeld een oever snel ondergraven of wordt bij hoogwater veel zand op de oeveren afgezet. De sedimenttransportcapaciteit wordt bepaald door de eigenschappen van het sediment

---

en de eigenschappen van de stroming. De hydraulica is het vakgebied dat de (stromings-)eigenschappen van vloeistoffen beschrijft en verklaard. Alvorens ingegaan zal worden op sedimenttransport zullen eerst enkele hydraulische relaties en grootheden worden behandeld.

Een deel van de hydraulica houdt zich bezig met de weerstand die stroming ondervindt. Eén van de bekendste stromingsweerstandformules is de formule van Chézy:

$$Q = CA(RS_e)^{0.5} \quad (9a)$$

of

$$u_{\text{gem}} = C(RS_e)^{0.5} \quad (9b)$$

waarin

$Q$  = afvoer ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C$  = Chézy-coëfficiënt ( $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ );

$A$  = doorstroomoppervlak ( $\text{m}^2$ );

$R$  = hydraulische straal (m);

$S_e$  = energiegradiënt (-);

$u_{\text{gem}}$  = gemiddelde stroomsnelheid in de dwarsdoorsnede, die gelijk is aan  $Q/A$  (m/s).

De formule van Chézy beschrijft hoe de afvoer door een geul afhangt van: (1) de stromingsweerstand in de geul, (2) de grootte van de geul, gemeten als de oppervlakte van de (natte) dwarsdoorsnede, (3) de hydraulische straal, de verhouding ( $A/O$ ) tussen het doorstroomoppervlak ( $A$ ) en de natte geulomtrek ( $O$ ) die bepaald wordt door de breedte-diepte-verhouding van de geul, en (5) de energiegradiënt, in de praktijk het verhang van de waterspiegel. Volgens de formule van Chézy neemt de afvoer toe bij een afname van de stromingsweerstand (hetgeen een hogere Chézy-coëfficiënt inhoudt!) en bij een toename van het doorstroomoppervlak, de hydraulische straal of de energiegradiënt. De formule van Chézy is een empirische vergelijking die geldt voor turbulente uniforme stationaire stroming. Turbulente stroming kenmerkt zich door kortdurende fluctuaties in stroomsnelheid en -richting, die resulteren in menging van waterlagen. Wanneer deze fluctuaties uitgemiddeld worden, geldt voor uniforme stroming dat de gemiddelde stroomsnelheid in de lengterichting niet varieert. In turbulente stationaire stroming verandert de gemiddelde stroomsnelheid niet in de tijd. Voor korte secties van beken of rivieren kan doorgaans uitgegaan worden van turbulente uniforme stationaire stroming.

De Chézy-coëfficiënt die de weerstand in de geul beschrijft moet experimenteel bepaald worden. De weerstand in een geul hangt vooral af van de ruwheid van het geuloppervlak, de vorm van de geul en van eventuele begroeiing in de geul. De ruwheid van het geuloppervlak wordt bepaald door de afmetingen van de sedimentkorrels en andere grotere oneffenheden van de bedding. Ook de vorm van de geul is van invloed op de weerstand, een sterk kronkelende geul heeft bijvoorbeeld meer (vorm-)weerstand dan een rechte geul. Verder kunnen riet langs de oever en waterplanten op de bodem de doorstroming sterk belemmeren (zie ook [paragraaf 2.9](#)) en de afvoercapaciteit van een geul beperken. In de Chézy-coëfficiënt voor een geul komt dus een aantal vormen van stromingsweerstand samen.

De Chezy-coëfficiënt kan op twee manieren bepaald worden. De eerste methode is door voor een bepaalde situatie alle andere grootheden uit de Chézy-vergelijking te meten en daaruit de Chézy-coëfficiënt te berekenen. Wanneer voor een beek of rivier veel van deze bepalingen uitgevoerd zijn voor verschillende dwarsdoorsnedes en bij verschillende waterstanden, kan een redelijke schatting gemaakt worden van de Chézy-coëfficiënt voor vergelijkbare situaties. De tweede methode om de Chézy-coëfficiënt te bepalen is door deze te berekenen op basis van een experimenteel bepaalde ruwheid met de formule:

$$C = 18 \log(12R/k_s) \quad (10)$$

waarin

$C$  = Chézy-coëfficiënt ( $m^{0.5}/s$ );

$R$  = hydraulische straal (m);

$k_s$  = Nikuradse-ruwheid (-).

De Nikuradse-ruwheid vertegenwoordigt de effectieve hoogte van ruwheidselementen op een overstroemd oppervlak. Voor allerlei materialen en vormen is een  $k_s$ -waarde bepaald. Zo geldt op een vlakke zand- of grindbodem dat  $k_s$  gerelateerd is aan de korreldiameter, waarbij geldt dat  $k_s \approx 3D_{90}$  (Van Rijn, 1994). Wanneer er beddingvormen aanwezig zijn (zie ook [paragraaf 2.8](#)) is de hoogte hiervan mede bepalend voor  $k_s$ . Bij grote stroomribbels wordt voor  $k_s$  bijvoorbeeld vaak de halve ribbelhoogte genomen. Voor allerlei begroeiingstypen zijn ook  $k_s$ -waarden bepaald, die overigens vaak afhankelijk zijn van de waterdiepte (zie ook [paragraaf](#)

2.9). Meestal wordt de totale ruwheid gedomineerd door één type ruwheidselementen. Er zijn methodes waarmee ruwheidswaarden voor verschillende typen ruwheidselementen en voor verschillende delen van de dwarsdoorsnede van een geul opgeteld kunnen worden om te komen tot een totale ruwheidswaarde en/of Chézy-coëfficiënt (Van Rijn, 1994).

De weerstand in een geul bepaalt de stroomsnelheid die op haar beurt weer sterk bepalend is voor het sedimenttransport. De invloed van de stroomsnelheid op sedimenttransport verschilt per korrelgrootte, hetgeen weergegeven is in [Figuur 2.16](#), een zogenoemd Hjulström-diagram. De bovenste curve daarin is de erosiecurve die laat zien dat fijn zand (korreldiameter ~0,1 mm) al kan worden geërodeerd bij stroomsnelheden van 20 cm/s, terwijl voor erosie van fijner en grover materiaal hogere stroomsnelheden nodig zijn. Bij fijner materiaal bemoeilijken cohesieve eigenschappen erosie, bij grover materiaal vraagt het grotere gewicht van de korrels meer stromingsenergie voor erosie. De onderste curve is de depositiecurve, die de zone afgrenst tussen transport en afzetting. Wanneer de stroomsnelheid daalt tot onder de erosiecurve, kan eerder geërodeerd materiaal namelijk nog wel in transport blijven. Pas wanneer de snelheid daalt tot onder de depositiecurve wordt dit materiaal afgezet. De verticale afstand tussen beide curves laat zien dat fijn materiaal, zoals klei en silt, bij een groot bereik aan stroomsnelheden in transport kan blijven (de linkerzijde van het diagram). Voor grover materiaal, zoals zand en grind, geldt een klein bereik van snelheden waarin nog transport plaats kan vinden (de rechterzijde van het diagram).

Dat korrels onder invloed van stroming in beweging komen heeft te maken met de schuifspanning die stromend water uitoefent op de bedding. De schuifspanning is als volgt gedefinieerd:

$$\tau_b = \rho g h S_e \quad (11)$$

waarin

$\tau_b$  = schuifspanning op de bedding (N/m<sup>2</sup>);

$\rho$  = dichtheid van water (kg/m<sup>3</sup>);

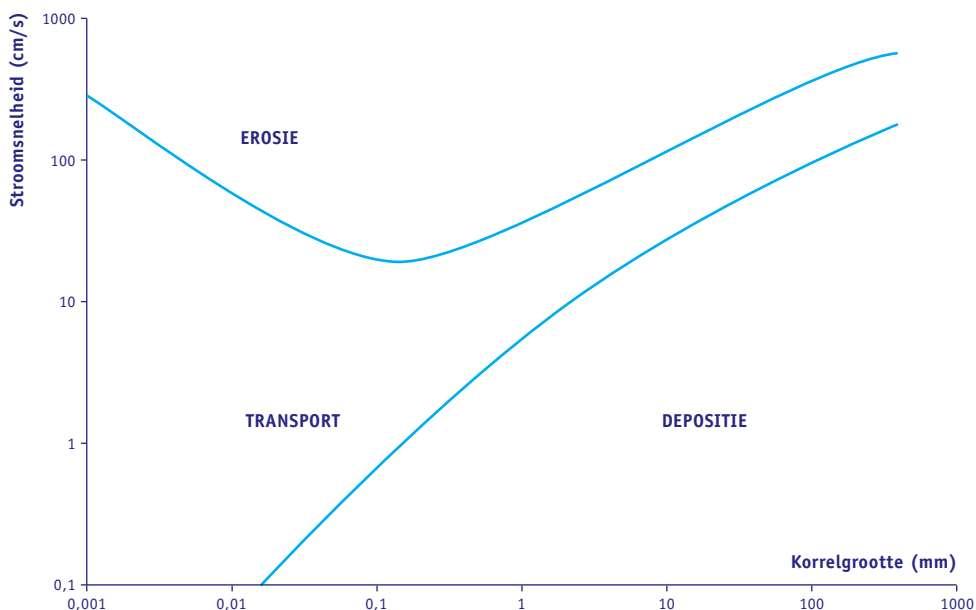
$g$  = zwaartekrachtsversnelling (m/s<sup>2</sup>);

$h$  = waterdiepte (m);

$S_e$  = energiegrediënt (-).

**Fig 2.16 EEN HJULSTRÖM-DIAGRAM**

Een Hjulström-diagram waarin erosie, transport en afzetting van sediment wordt gerelateerd aan korrelgrootte (horizontale as) en stroomsnelheid (verticale as). Het diagram geldt voor water dat over een los sedimentoppervlak stroomt. De bovenste curve geeft de ondergrens voor erosie van het sedimentoppervlak, de onderste curve geeft de bovengrens voor sedimentafzetting. In de zone tussen beide curves kan eerder geërodeerd sediment in transport blijven (Bron: Wikipedia).



Bovenstaande vergelijking laat zien dat de schuifspanning afhankelijk is van de waterdiepte en de gradiënt, die beide volgens de formule van Chézy de stroomsnelheid bepalen. De schuifspanning is dus sterk gerelateerd aan de stroomsnelheid.

Wanneer de schuifspanning een kritische waarde overschrijdt ( $\tau_{b,cr}$ ) komen de sedimentkorrels in beweging. De kritische schuifspanning is voor allerlei korrelgroottes experimenteel bepaald en weergegeven in [Figuur 2.17](#). Deze figuur is sterk verwant aan het Hjulström-diagram en geeft in feite een erosiecurve voor zand (grover dan 0,1 mm) en grind, waarbij de stroomsnelheid op de verticale as vervan-



---

gen is door de schuifspanning. De schuifspanningsbenadering van sedimenttransport geeft een betere fysieke beschrijving van het proces en heeft het praktische voordeel dat stroomsnelheidsmetingen dicht boven de bedding overbodig zijn.

Vaak wordt de mate waarin sedimentkorrels door stromend water in beweging gebracht kunnen worden, uitgedrukt in een dimensieloze mobiliteitsparameter die een krachtenverhouding weergeeft. De verhouding tussen de hydraulische kracht ( $\tau_b$ ) en de weerstandskracht, een combinatie van zwaartekracht en wrijving, bepaalt of een sedimentkorrel in beweging komt. De weerstandskracht is afhankelijk van de grootte en het relatieve gewicht van de korrel ten opzichte van water. De verhouding tussen hydraulische kracht en weerstandskracht is de Shields-parameter, die als volgt is gedefinieerd:

$$\theta = \tau_b / [(Q_s - Q) g d] \quad (12)$$

waarin

- $\theta$  = Shields-parameter (-);
- $\tau_b$  = schuifspanning op de bedding ( $N/m^2$ );
- $Q_s$  = dichtheid van sediment ( $kg/m^3$ );
- $Q$  = dichtheid van water ( $kg/m^3$ );
- $g$  = zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ );
- $d$  = korreldiameter van het sediment (m).

Als de Shields-parameter de kritische waarde overschrijdt ( $\theta > \theta_{cr}$ ) dan is er beweging van sediment. De kritische Shields-parameter kan berekend worden met de kritische schuifspanning (Fig. 2.17) of kan afgelezen worden uit via experimenteel onderzoek verkregen diagrammen.

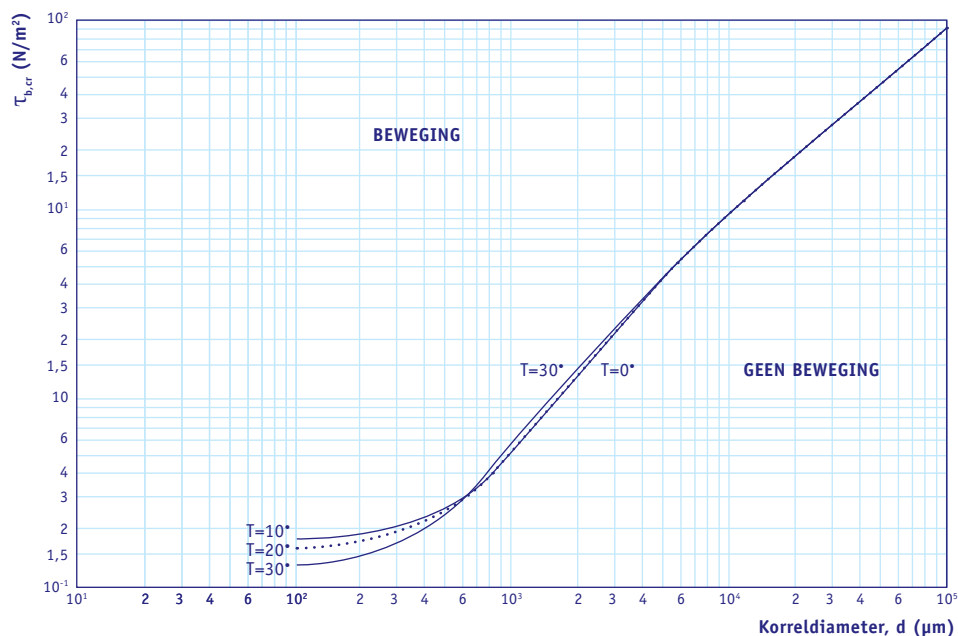
De beweging van sedimentkorrels onder invloed van stroming kan op drie manieren plaatsvinden: (1) rollend over de bedding, (2) salterend of springend, of (3) in suspensie, wat wil zeggen dat de korrel meegenomen wordt in de stroming zonder tussentijds contact te maken met de bedding. Fijne sedimenten worden doorgaans in suspensie getransporteerd, terwijl grove sedimenten rollend of salterend over de bedding bewegen.

Er zijn vele formules beschikbaar om het sedimenttransport in een bedding te bere-

kenen. Deze formules gelden voor het transport van het op de bedding beschikbare materiaal en maken daarbij vaak onderscheid tussen het rollend en salterend transport enerzijds, en het suspensief transport anderzijds. De formules gelden niet voor het zogenoemde spoeltransport. Dit is suspensief transport van een fijne tot zeer fijne sedimentfractie die niet opgenomen is uit de bedding, maar die bijvoorbeeld door afspoeling van hellingen in de beek of rivier terechtgekomen is. De sedimenttransportcapaciteit voor spoeltransport is vaak zeer groot en de mate waarin spoeltransport optreedt wordt derhalve hoofdzakelijk bepaald door het materiaalaanbod. De sedimenten die in spoeltransport zijn komen vrijwel nooit in de bedding tot afzetting en zijn daarom geen factor in de geomorfologische ontwikkeling van de bedding. Zij komen wel tot afzetting bij overstroming van de beek- of riviervlakte en beïnvloeden daar de geomorfologische ontwikkeling op de lange tijdschaal.

### Fig 2.17 DE KRITISCHE SCHUIFSPANNING VOOR VERSCHILLENDE KORRELDIAMETERS

Experimenteel bepaalde curve die voor stroming over een vlakke sedimentbedding de kritische schuifspanning (verticale as) geeft als functie van de korreldiameter (horizontale as). Voor verschillende temperaturen gelden enigszins verschillende curves, omdat de viscositeit van water, die de sedimentopname mede bepaalt, temperatuurafhankelijk is (naar Van Rijn, 1993).



---

Een veel gebruikte empirische formule om het sedimenttransport van beddingmateriaal te berekenen is die van Engelund & Hansen (1967):

$$q_t = (Q_s 0,05 u_{gem}^5) / [(s-1)^2 g^{0,5} D_{50} C^3] \quad (13)$$

waarin

- $q_t$  = sedimenttransport (kg/m/s);
- $Q_s$  = soortelijke dichtheid van sediment (kg/m<sup>3</sup>);
- $u_{gem}$  = gemiddelde stroomsnelheid in de geul (m/s);
- $s$  = specifieke sedimentdichtheid ( $Q_s/Q$ );
- $Q_s$  = dichtheid van sediment (kg/m<sup>3</sup>);
- $Q$  = dichtheid van water (kg/m<sup>3</sup>);
- $g$  = zwaartekrachtsversnelling (m/s<sup>2</sup>);
- $D_{50}$  = mediaan van de korrelgrootteverdeling van het beddingmateriaal (m);
- $C$  = Chezy-waarde (m<sup>0,5</sup>/s).

Om te komen tot een totaal sedimenttransport door de natte doorsnede van de geul moet  $q_t$  worden vermenigvuldigd met de breedte van de geul. De formule van Engelund & Hansen maakt geen onderscheid tussen rollend/salterend en suspensief transport van beddingmateriaal. Uit de formule blijkt dat het sedimenttransport zeer sterk bepaald wordt door de stroomsnelheid.

De formule van Engelund & Hansen is relatief eenvoudig en vraagt invoergegevens die voor veel waterlopen beschikbaar zijn. Ondanks haar eenvoud is de voorspellende kracht van de formule vrij groot. Een conceptueel nadeel is dat de formule geen rekening houdt met kritische schuifspanning: bij zeer lage stroomsnelheden onder de kritische grens voor beddingerosie treedt toch enig sedimenttransport op. Toch blijkt ook bij lage stroomsnelheden de formule van Engelund & Hansen het sedimenttransport relatief goed te voorspellen (Van den Berg & Van Gelder, 1993).

Een alternatieve sedimenttransportformule is die van Van Rijn (1984a, 1984b). Deze formule is veel complexer dan die van Engelund & Hansen en maakt onderscheid tussen rollend/salterend en suspensief transport van beddingmateriaal. Een belangrijk verschil is verder dat de formule van Van Rijn uitgebreidere invoergegevens over de korrelgrootteverdeling van het beddingsediment vraagt. Omdat de formule van Van Rijn bij lage stroomsnelheden het sedimenttransport onderschat, hebben Van

den Berg & Van Gelder (1993) enkele aanpassingen aan de formule gedaan die de voorspellende kracht voor lage stroomsnelheden aanzienlijk vergroot hebben.

Voor de hydraulica en het sedimenttransport van kleine waterlopen, zoals beken, kan verwacht worden dat de beddingruwheid vrij groot is en sterk bepaald wordt door vegetatie, en dat de stroomsnelheden in een groot deel van het jaar dicht bij de kritische grens voor sedimentbeweging liggen, zodat het totale transport van beddingsediment relatief laag is. In aanvulling op het klastische beddingsediment (klei, silt, zand en grind) transporteren sommige beken grote hoeveelheden organisch materiaal. De bovenbeschreven relaties zijn van toepassing op klastisch materiaal. Het transport van organisch materiaal is, net als het klastische spoeltransport, niet met formules te voorspellen.

## 2.8 BEDDINGVORMEN

In de bedding van een beek of rivier vinden we allerlei kleinere en grotere vormen die het gevolg zijn van actieve sedimenttransportprocessen. Er zijn twee groepen vormen te onderscheiden: (1) relatief kleine beddingvormen die velden van regelmatige patronen vormen, zich voortdurend aanpassen aan de stromingscondities en zich niet opbouwen tot boven de gemiddelde waterhoogte; (2) relatief grote beddingvormen, meestal banken genoemd, die een levensduur hebben van meerdere hoogwaterperiodes en die zich onder gunstige condities op kunnen bouwen tot boven de gemiddelde waterhoogte. Binnen beide groepen geldt dat de Shields-parameter sterk bepalend is voor welk type vorm ontstaat. Specifiek voor de tweede groep geldt dat daarnaast ook de vorm van de bedding het type en de locatie van de vormen sterk beïnvloed.

Het meest algemeen voorkomend zijn de kleine stroomribbels, die een golflengte hebben die veel kleiner is dan de waterdiepte (Fig. 2.18). Voor het ontstaan van stroomribbels is een zandig beddingmateriaal vereist. Bij lage stroomsnelheden is de bedding glad. Bij toenemende stroomsnelheden vormen zich op de bedding stroomribbels. Bij nog verder toenemende stroomsnelheden en alleen in wat grover zand kunnen zich megaribbels (Fig. 2.19) of zandduinen vormen. Dit zijn beddingvormen met een golflengte die veel groter is dan de waterdiepte. Op de rug van megaribbels zijn doorgaans kleinere stroomribbels gesuperponeerd. Bij nog verder toenemende stroomsnelheden doven de ribbels uit en ontstaat een gladde bedding. In beken hebben we vooral met gladde beddingen en stroomribbels te maken.

---

**Fig**      **STROOMRIBBELS**

**2.18**      *Vorming van stroomribbels in een ondiepe bedding bij lage stroomsnelheden.*



---

**Fig**      **MEGARIBBELS**

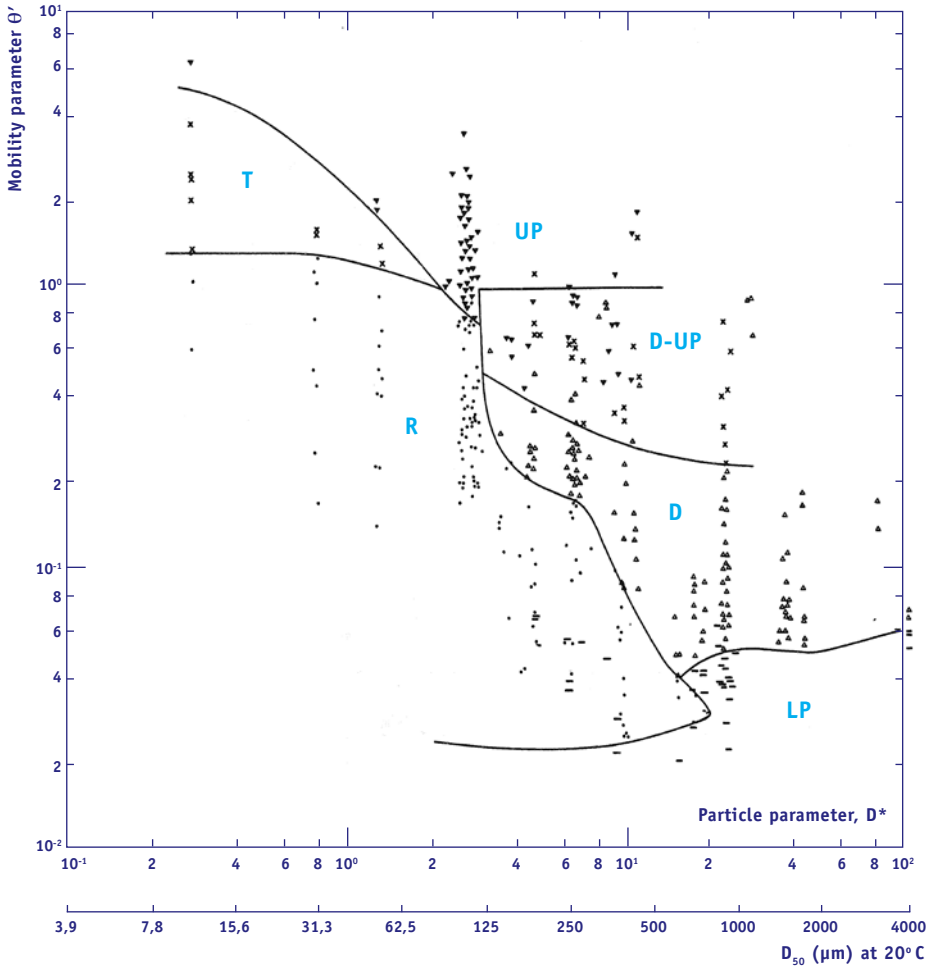
**2.19**      *Drooggevallen megaribbels in een ondiepe geul van de anastomoserende upper Columbia River (British Columbia, Canada).*



**Fig 2.20 STABILITEITSDIAGRAM VOOR BEDDINGVORMEN**

2.20

Stabiliteitsdiagram waarin voor verschillende typen beddingvormen de Shields-parameter ( $\theta$ , hier de korrelgerelateerde mobiliteitsparameter  $\theta'$  genoemd) is uitgezet tegen de mediaan van de korrelgrootte van het beddingmateriaal. De laatste is gegeven als de dimensieloze parameter  $D^*$ . Deze is gekoppeld aan de  $D_{50}$  via de volgende vergelijking:  $D^* = D_{50} [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$  (symbolen zoals eerder gegeven;  $\nu$  = kinematische viscositeitscoëfficiënt in  $m^2/s$ ,  $\nu$  is temperatuurafhankelijk en doorgaans ca.  $1 \cdot 10^{-6} m^2/s$ ). Bij een watertemperatuur van  $20^\circ C$  geldt de onderste korrelgrootteschaalverdeling. Legenda voor de beddingvormen: LP = vlakke bedding onder laag-energetische stroming; R = stroomribbels; D = megaribbels of duinen; T = overgang; UP = vlakke bedding onder hoog-energetische stroming (Van den Berg, 1993).



---

Net als voor geultypen ([paragraaf 2.4](#)) zijn ook voor beddingvormen stabiliteitsdiagrammen ontwikkeld die het voorkomen van bepaalde typen beddingvormen koppelen aan sedimentkarakteristieken en stromingscondities. In [Figuur 2.20](#) is een diagram gegeven waarin het type beddingvorm gerelateerd is aan de korrelgrootte en de Shields-parameter. In dit diagram is vooral het fijnere sediment (fijn zand en silt) goed vertegenwoordigd, wat het geschikt maakt voor toepassing op kleinere waterlopen, zoals beken.

Te zien is hoe voor fijne beddingsedimenten (de linkerkant van het diagram) een toename van de Shields-parameter zich uit in het ontstaan van stroomribbels op een vlakke bedding. Bij een nog verder toenemende Shields-parameter treedt er een overgang naar een vlakke bedding op. Bij grovere beddingsedimenten (rechtterkant van het diagram) kunnen zich megaribbels of duinen ontwikkelen, vooral bij hogere waarden van de Shields-parameter. [Figuur 2.20](#) kan gebruikt worden om het type beddingvormen dat in een waterloop op zal treden te voorspellen.

Voor vorming van grotere beddingvormen (banken) moet in de eerste plaats voldoende ruimte in de bedding aanwezig zijn. Wanneer voldoende ruimte aanwezig is in een bedding is er (sterke) laterale variabiliteit in stromingscondities en kunnen banken zich vormen op plaatsen waar de stromingscondities afzetting van sediment toelaten, midden in de geul, of langs de oever. In het laatste geval spreken we van laterale banken ([Fig. 2.21](#)). De vorming van banken kan lokaal zijn, en bijvoorbeeld worden gestuurd door een plaatselijke verbreding van de geul ([Fig. 2.22](#)), dichte oevervegetatie ([Fig. 2.15](#)), dichte aquatische vegetatie of een plotse linge scherpe bocht (Wolfert, 2001).

Vaak echter vormen banken een patroon, waarbij drie verschillende basistypen voor kunnen komen: (1) eilanden of vrije banken, die midden in de bedding voor kunnen komen en niet gekoppeld zijn aan een bepaalde oevergeometrie, (2) alternerende banken, die in een regelmatig patroon afwisselend links en rechts in de geul voorkomen, waarbij de positie van de banken niet gekoppeld is aan het geulpatroon, (3) plaatsvaste (kronkelwaard-)banken die bijvoorbeeld ontstaan in de binnenbochten van meanderende geulen, maar die ook lokaal in niet-meanderende geulen voorkomen waar de beddinggeometrie dit toestaat.

---

**Fig** EEN LATERALE BANK LANGS DE SLINGE**2.21** *(Foto Maarten Klein hans)*

---

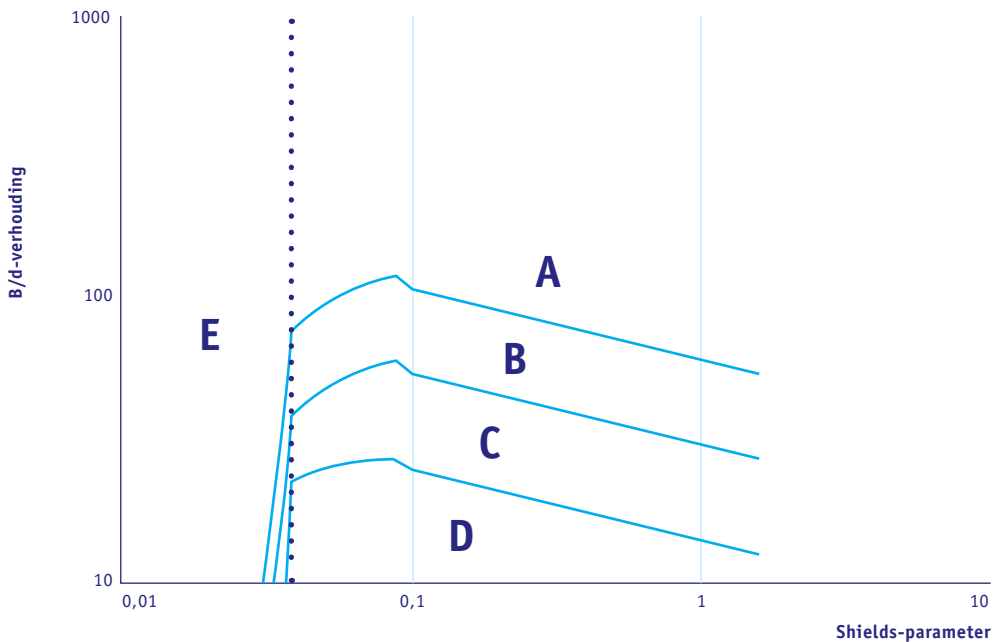
**Fig** EEN LATERALE BANK LANGS DE DOMMEL**2.22** *De bank ligt in een lokale verbreding van de geul. Een regelmatig patroon van stroomribbels heeft zich ontwikkeld op de flank van de bank (voorggrond).*



Ook voor het type banken kan een stabiliteitsdiagram opgesteld worden, waarin velden gedefinieerd zijn op basis van de Shields-parameter en de breedte/diepte-verhouding van de geul. In [Figuur 2.23](#) is te zien hoe bij een toenemende breedte/diepte-verhouding vanuit een situatie zonder banken, eerst plaatsvaste (kronkelwaard-)banken ontstaan, vervolgens alternerende banken, en uiteindelijk eilanden en vrije banken. Voor vorming van banken moet wel een ondergrens van de Shields-parameter overschreden worden. Bij hogere waarden van de Shields-parameter doen de overgangen tussen de verschillende velden zich bij een steeds lagere breedte/diepte-verhouding voor. Bij een grote mobiliteit van het beddingsediment kan bankvorming bij relatief weinig ruimte in de geul al optreden.

**Fig 2.23** **STABILITEITSDIAGRAM VOOR BANKTYPEN**

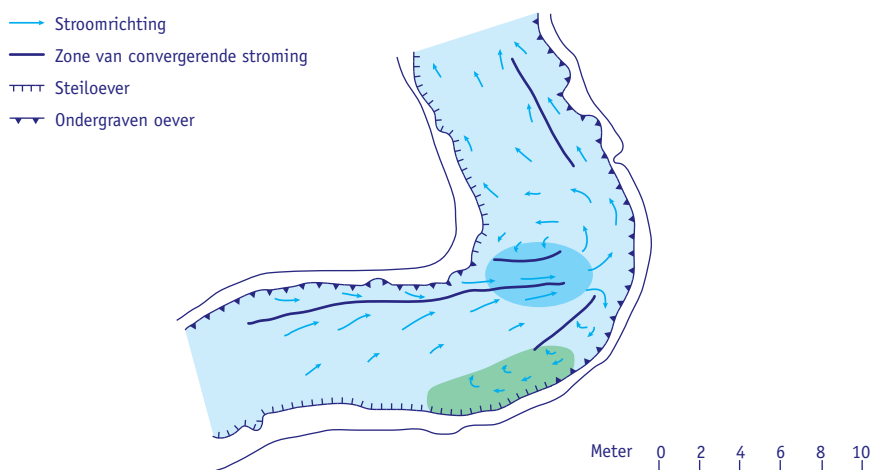
*Stabiliteitsdiagram waarin verschillende situaties met betrekking tot bankmorfologie worden onderscheiden aan de hand van breedte/diepte-verhouding van de bedding en de Shields-parameter. A = vorming van eilanden en vrije banken; B = vorming van alternerende banken; C = vorming van plaatsvaste (kronkelwaard-)banken; D = vorming van banken wordt onderdrukt; E = beddingsediment wordt niet gemobiliseerd (naar Middelkoop et al., 2003).*



Voor beken en kleine rivieren geldt doorgaans een vrij lage breedte/diepte-verhouding en een lage Shields-parameter. [Figuur 2.23](#) geeft aan dat onder deze omstandigheden, wanneer beddingsediment kan worden gemobiliseerd, bankvorming wordt onderdrukt of plaatsvaste banken worden gevormd. Vorming van alternerende banken vraagt condities die uitzonderlijk zijn voor Nederlandse beken (Eekhout & Hoitink, 2014).

### Fig 2.24 HET STROMINGSPATROON IN EEN SCHERPE BOCHT VAN DE KEERSOP

De stroomdraad ligt tegen het eerste deel van de binnenbocht, waar oevererosie plaatsvindt. Een schuurgat (blauw) ligt midden in de bocht, waar de stroming sterk convergeert. De tegen de buitenoever botsende stroming zorgt voor het ontstaan van circulaties (neren). In de groene zone langs de oever heersen zwakke stromingen en komt fijn sediment tot afzetting (Wolfert, 2001).



De tegenhangers van banken zijn de schuurgaten, die kunnen ontstaan op plaatsen waar de stroomsnelheid hoog is. In het algemeen is dit in buitenbochten, ongeveer halverwege de bocht. Sterke uitschuring van de bedding kan bijdragen aan instabiliteit van de naburige oever. In scherpe bochten met slecht erodeerbare oevers kunnen schuurgaten ook ontstaan in het midden van de geul. Dit heeft te maken met

---

het specifieke stromingspatroon in dergelijke bochten: doordat de stroomdraad 'moeite' heeft om de scherpe bocht te volgen ligt hij aanvankelijk tegen de binnenbocht en steekt hij pas halverwege de bocht over naar de buitenkant van de bocht (Fig. 2.24). Door de scherpste van de bocht botst de stroming hier als het ware tegen de slecht erodeerbare oever, waarbij de stroming zich splitst en circulatiecellen (neren) ontstaan. In zo'n geval convergeert de stroming in het midden van de bocht en ontstaat daar het schuurgat, in plaats van langs de buitenoever. In de neer langs de buitenoever is een zone met lage stroomsnelheden waarin (fijn) sediment en organische stof neerslaan en een ondiepte of bank vormen. Deze lokale circulaties en bijbehorende vormen komen vrij algemeen voor in Nederlandse beken (zie bijvoorbeeld Wolfert, 2001). De sedimentafzettingen die behoren bij deze stromingspatronen zijn voor rivieren beschreven door Makaske & Weerts (2005).

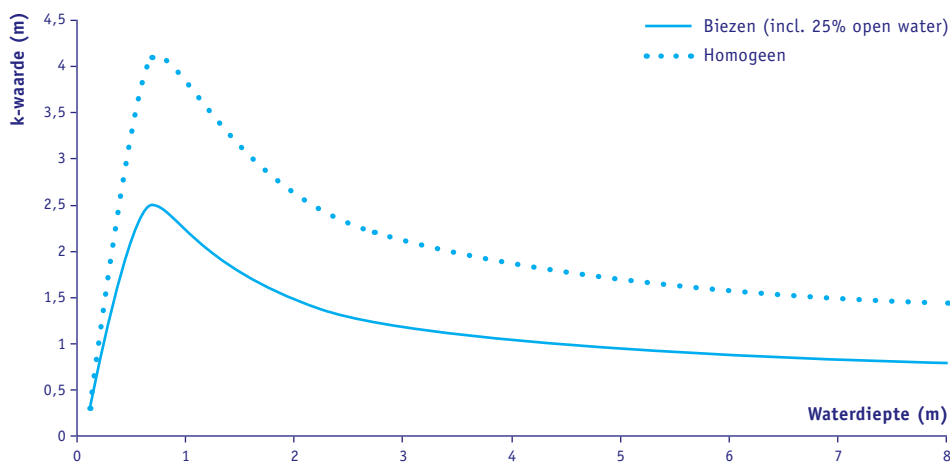
Er is een sterke procesmatige wisselwerking tussen beddingvormen en de geometrie van de bedding. Schuurgaten in de buitenbocht zijn enerzijds het gevolg van de bocht, maar beïnvloeden anderzijds ook de ontwikkeling van de oever en het geulpatroon. Evenzo kan vorming van alternerende banken een eerste aanzet tot meanderen zijn. Monitoring van beddingvormen kan veel informatie opleveren over de richting waarin het geulpatroon zich ontwikkelt. Daarnaast zijn beddingvormen en hun dynamiek sturend voor substraatvariabiliteit in de bedding en daarmee bepalend voor de diversiteit en veerkracht van aquatische ecosystemen. Beddingvormen, alhoewel minder zichtbaar dan de geomorfologie van bochten en oevers, zijn een essentiële schakel in beekherstel.

## 2.9 VEGETATIERUWHEID

Wanneer vegetatie in de bedding van een beek of rivier aanwezig is zal de stroming hiervan weerstand ondervinden. Net als de overige weerstand in een waterloop is de vegetatieweerstand kwantitatief te beschrijven met de Chézy-coëfficiënt en de daaraan gekoppelde Nikuradse-ruwheidswaarde (paragraaf 2.7). Het inschatten van de vegetatieweerstand is niet eenvoudig, er is immers een oneindige variatie in de vorm, de afmetingen en de dichtheid van vegetatie. Querner & Makaske (2012) onderscheiden drie concepten waarmee het effect van vegetatie op stromend water kan worden ingeschat: (1) met behulp van experimenteel bepaalde vegetatie-specifieke ruwheidswaarden in de literatuur, (2) door de Nikuradse-ruwheidswaarde ( $k_s$ ) gelijk aan de vegetatiehoogte te stellen, en (3) door stroming door de vegetatie te verwaarlozen. Deze drie concepten zullen hieronder besproken worden.

Van allerlei vegetatietypen in uiterwaarden is de ruwheid bepaald (Van Velzen *et al.*, 2003) om de doorstroomcapaciteit van het winterbed bij hoogwater te kunnen bepalen. Hoewel de studie van Van Velzen *et al.* (2003) speciaal gericht was op de uiterwaarden van de grote rivieren, zijn de bepalingen voor een aantal van de nattere vegetatietypen ook bruikbaar voor beken. Het gaat hierbij om de volgende vegetatietypen: pioniervegetatie, natte ruigte, zegge, rietgras, biezen, lisdodde en riet. Als voorbeeld is in [Figuur 2.25](#) een diagram voor de Nikuradse-ruwheidswaarde van biezen gegeven. Te zien is hoe deze sterk afhangt van de waterdiepte, vooral bij waterdieptes tot 1 m die voor beken vaak van toepassing zijn. Met het werk van Van Velzen *et al.* (2003) kan voor beken een vrij nauwkeurige inschatting van de ruwheid worden gemaakt, mits typen en oppervlakten van vegetaties en de bijbehorende waterdiepten bekend zijn.

**Fig 2.25 DE NIKURADSE-RUWHEIDSWAARDE VOOR BIEZEN ALS FUNCTIE VAN DE WATERDIEPTE**  
(naar Van Velzen *et al.*, 2003).



In de internationale literatuur zijn vooral ruwheidswaarden voor met gras begroeide waterlopen te vinden. Deze zijn dan meestal gegeven als Manning-coëfficiënt, een manier om ruwheid uit te drukken die vooral in de Engelstalige literatuur gangbaar is. De Manning-coëfficiënt lijkt op de Chezy-coëfficiënt maar is

ander gedefinieerd. Een belangrijk verschil is dat een hogere Manning-coëfficiënt een grotere weerstand betekent, terwijl een hogere Chezy-coëfficiënt een kleinere weerstand betekent. De Manning-vergelijking is als volgt:

$$u_{\text{gem}} = 1/n R^{2/3} S_e^{1/2} \quad (14)$$

waarin

$u_{\text{gem}}$  = gemiddelde stroomsnelheid in de dwarsdoorsnede, die gelijk is aan  $Q/A$  (m/s);

$Q$  = afvoer ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$A$  = doorstroomoppervlak ( $\text{m}^2$ );

$n$  = Manning-coëfficiënt ( $\text{s m}^{-1/3}$ );

$R$  = hydraulische straal (m);

$S_e$  = energiegrediënt (-).

Voor begroeide beddingen ligt de Manning-coëfficiënt ongeveer tussen 0,02 en 0,10  $\text{s m}^{-1/3}$ . In [Tabel 2.1](#) zijn Manning-coëfficiënten voor een aantal begroeiings-situaties gegeven.

## Tabel 2.1 REPRESENTATIEVE STROMINGSWEERSTANDEN

Representatieve stromingsweerstand (Manning-coëfficiënt) uit Chow (1959).

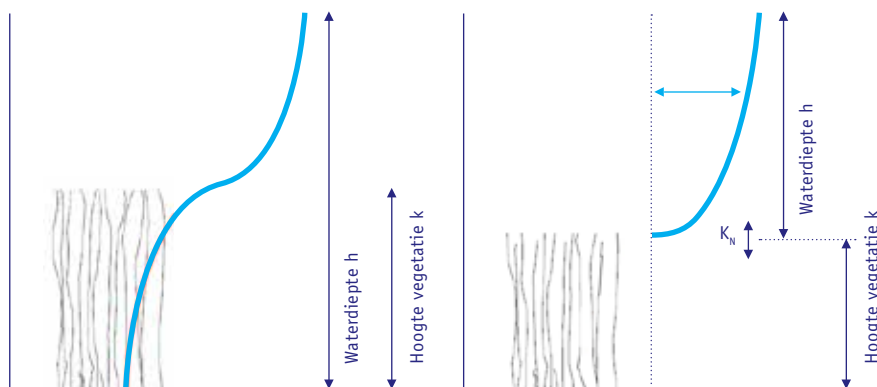
OMSCHRIJVING CHOW (1959)	n-waarde ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ )		
	MIN.	GEM.	MAX.
Short grass	0,025	0,030	0,035
High grass	0,030	0,035	0,050
Brush (heavy weeds)	0,035	0,050	0,070
Medium to dense brush in winter	0,045	0,070	0,110

Een alternatief voor het gebruik van experimenteel bepaalde ruwheidswaarden uit de literatuur, is de aanpak 'ruwheid is vegetatiehoogte'. Omdat de Nikuradse-ruwheidswaarde ( $k_s$ ) de hoogte van ruwheidselementen vertegenwoordigt, kan de ruwheid van vegetatie benaderd worden door  $k_s$  gelijk te veronderstellen aan de

vegetatiehoogte (Fig. 2.26). Wanneer de hydraulische straal ( $\approx$  waterdiepte) bekend is, kan de Chézy-waarde vervolgens berekend worden (paragraaf 2.7). Het voordeel van deze aanpak is zijn eenvoud en inzichtelijkheid. Querner & Makaske (2012) hebben laten zien dat voor combinaties van korte vegetaties (gras, ruigtes en riet) deze aanpak leidt tot resultaten die qua orde van grootte vergelijkbaar zijn met die verkregen door toepassing van de experimenteel bepaalde ruwheidswaarden van Van Velzen *et al.* (2003). In het algemeen leidt de aanpak ‘ruwheid is vegetatiehoogte’ tot wat lagere ruwheidswaarden dan die bepaald zijn door Van Velzen *et al.* (2003).

### Fig 2.26 STROOMSNELHEIDSPROFIELEN VOOR EEN OVERSTROOMDE VEGETATIE

Links het definitiediagram voor de aanpak ‘ruwheid is vegetatiehoogte’, waarin wordt uitgegaan van stroming door de vegetatie en een ruwheidswaarde die gelijk is aan de vegetatiehoogte. Rechts het definitiediagram voor de aanpak ‘geen stroming door de vegetatie’, waarin de stroming door de vegetatie wordt verwaarloosd en waarbij een ruwheidswaarde ( $k_N$ ) voor de top van de vegetatie wordt ingeschat (Querner & Makaske, 2012).



Voorals voor dichte vegetaties is nog een derde aanpak mogelijk: ‘geen stroming door de vegetatie’. Het begroeide gedeelte heeft met name voor korte vegetaties een geringe invloed op de totale afvoer ten opzichte van het open-watergedeelte van de waterloop. Voor waterlopen is het verwaarlozen van de afvoer door het

---

begroeide deel onderzocht (Querner, 1995). Er wordt dan alleen met het open-waterdeel gerekend en een ruwheidswaarde voor de top van de vegetatie ( $k_N$  in Fig. 2.26). Querner & Makaske (2012) hebben voor korte vegetaties de resultaten van deze aanpak vergeleken met resultaten verkregen via andere methodes ('ruwheid is vegetatiehoogte' en gebruik van experimentele ruwheidswaarden uit de literatuur). Zij laten zien dat de aanpak 'geen stroming door de vegetatie' resultaten op kan leveren die dichtbij die van de aanpak 'ruwheid is vegetatiehoogte' liggen. Dit is echter wel sterk afhankelijk van de inschatting van de ruwheidswaarden voor de top van de vegetatie.

Geomorfologisch beekherstel zal in veel gevallen leiden tot verandering van vegetaties in en langs de bedding. Een goede inschatting van de ontwikkeling van de vegetatieruwheid is dan essentieel om de totale hydrologische effecten van het project te kunnen evalueren. Daarnaast is de vegetatieruwheid van invloed op de morfodynamiek: ruwe vegetaties vangen veel sediment in. Vanwege de kleine waterdieptes en lage stroomsnelheden kan vegetatie zich makkelijk in of langs een beek vestigen. Ten opzichte van rivieren heeft vegetatie in beken veel hydraulische invloed en daarom is het een bepalende factor in herstelprojecten.

## 2.10 MORFODYNAMIEK IN DE OVERSTROMINGSVLAKTE

### Sedimentatie ten gevolge van inundatie

Het belangrijkste morfologische proces in de overstromingsvlakte van beken is sedimentatie ten gevolge van inundatie. Wanneer de beek het bovenstroomse wateraanbod niet meer binnen de geul kan afvoeren treedt zij buiten haar oevers. Samen met het water wordt ook, afhankelijk van het type beek en de condities in het stroomgebied, in meerdere of mindere mate sediment aangevoerd. Een deel van dat sediment wordt door de geul verder stroomafwaarts getransporteerd, een ander deel wordt afgezet in de dalvlakte. De totale hoeveelheid afgezet sediment in de dalvlakte is van veel zaken afhankelijk en doorgaans ruimtelijk sterk variabel. Naast de hoeveelheid is ook de textuur van het afgezette sediment van groot belang voor het ecologisch functioneren van het beekdal. Evenals de hoeveelheid vertoont ook de textuur van sedimenten meestal een sterke ruimtelijke variatie. Hieronder zullen ruimtelijke trends in sedimentatie en hun oorzaken besproken worden. Daarna zal kort ingegaan worden op absolute hoeveelheden sediment die afgezet kunnen worden onder bepaalde condities. Afsluitend zullen enkele opmerkingen over de invloed van sedimentatie op vegetatie gemaakt worden.

Wanneer een gebied vanuit een beek onderloopt slaat op korte afstand van de geul veel relatief grof (meestal sterk zandig) sediment neer (Fig. 2.27). Dit wordt veroorzaakt door de afnemende stroomsnelheid van het water, doordat de ruwheid van de overstromingsvlakte de ondiepe stroming sterk afremt en omdat de stroming vaak uitwaaiert. Langzame stroming kan minder en kleinere sedimentdeeltjes transporteren dan snelle stroming en derhalve slaan de grovere delen niet ver van de waterloop neer. Onder deze condities neemt de hoeveelheid en gemiddelde korrelgrootte van het afgezette sediment vaak sterk af met een toenemende afstand tot de waterloop. De afstand vanaf de geul waarover zandig sediment wordt afgezet is sterk variabel en afhankelijk van diverse factoren.

Wanneer er over langere afstand langs een beekloop een uitwisseling tussen de geul en de naastliggende overstromingsvlakte mogelijk is, zal door het bovengenoemde proces een oeverwal gevormd worden: een zandige verhoging langs de geul die geleidelijk afhelt naar een lager, verder van de waterloop gelegen, komgebied. Indien er sprake is van een beperkte instroomopening van de geul naar de overstromingsvlakte vormt zich direct hierachter een zandige sedimentwaaier. Dit proces kan optreden bij een natuurlijke lokale doorsnijding van een oeverwal. De geul die daarbij ontstaat wordt een crevasse genoemd en de sedimentafzetting een crevassewaaier.

**Fig 2.27** AFZETTING VAN ZAND OP DE OEVERS VAN DE DOMMEL NA HOOGWATER

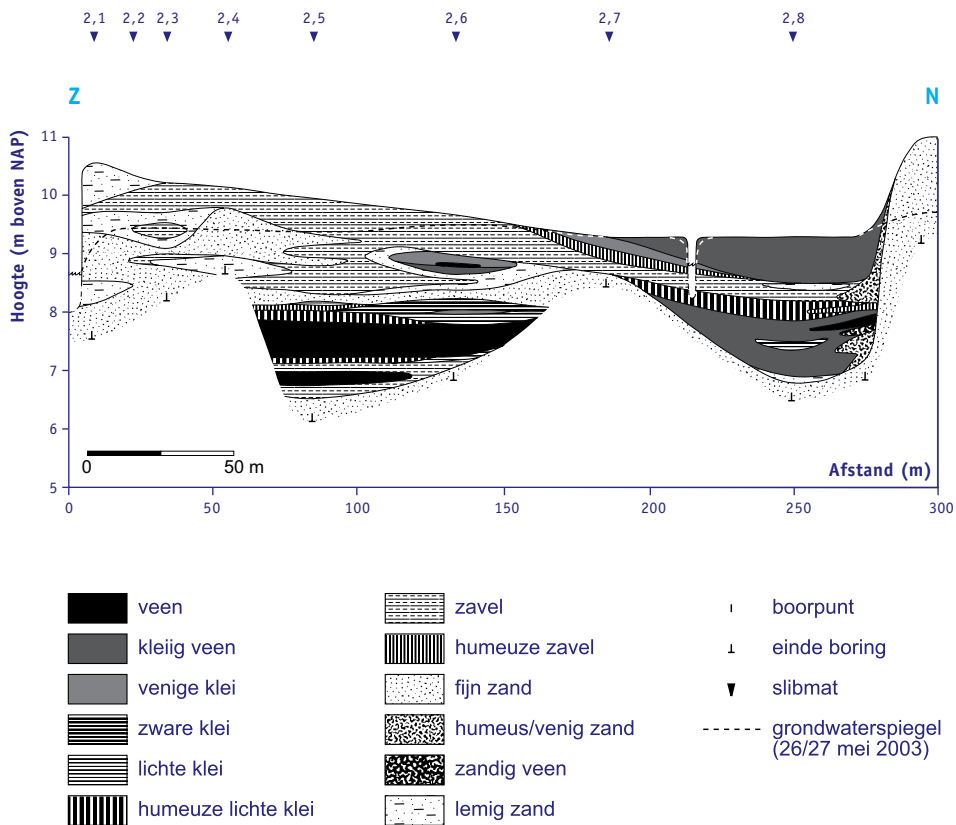
*De breedte van de afzettingszone is ca. 5 meter.*

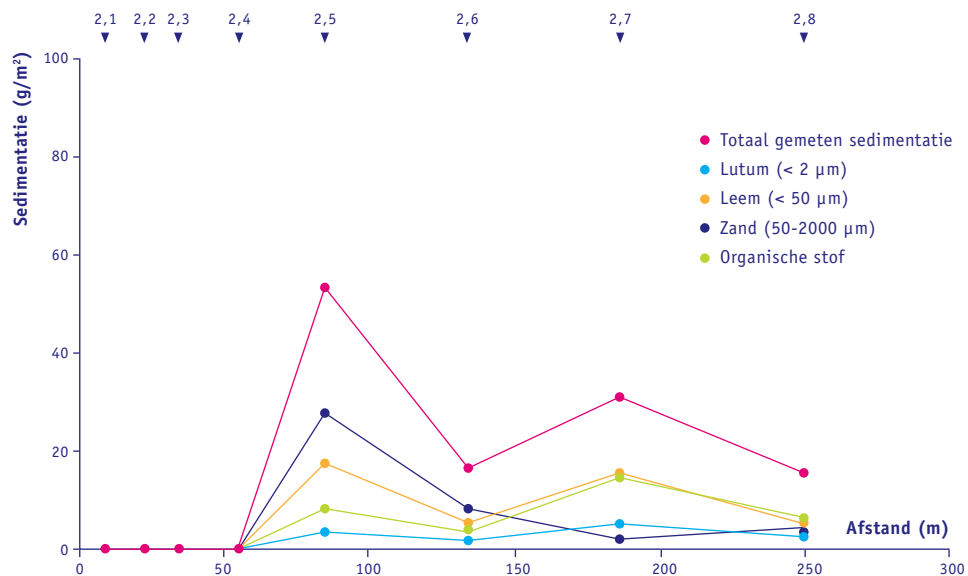
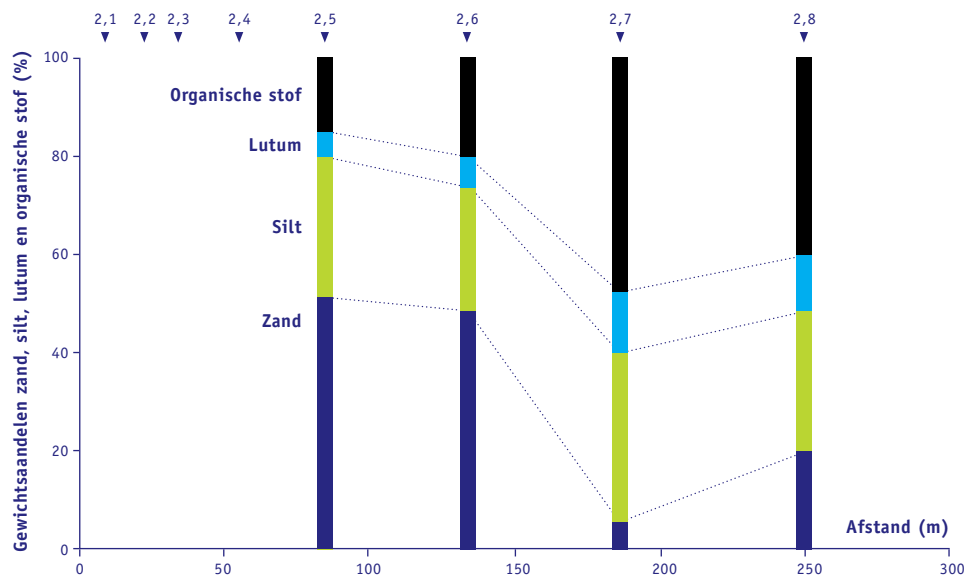




**Fig 2.28 DE ONDERGROND EN RECENTE SEDIMENTAFZETTING LANGS DE DOMMEL**

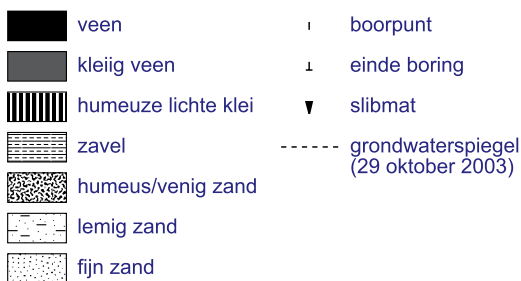
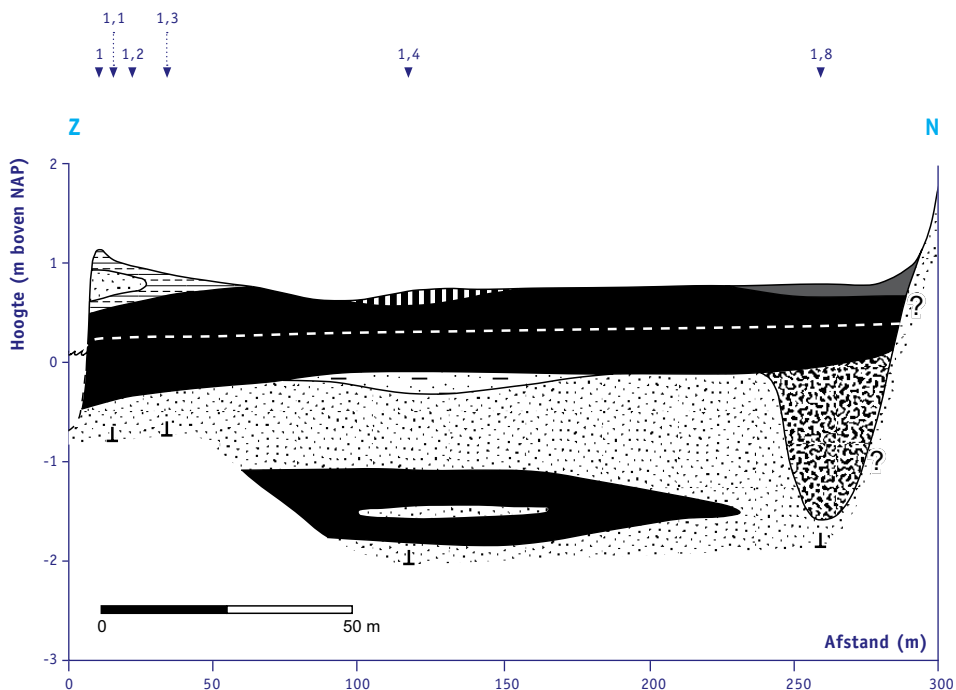
Onder: een profiel van de ondergrond in de Dommelbeemden loodrecht op de Dommel (bedding uiterst links) met daarin aangegeven de terreinhoogte, de locaties van slibmatten en de grondwaterspiegel tijdens het uitvoeren van de grondboringen. Rechtsonder: de corresponderende sedimentatiemetingen met de slibmatten (seizoen 2003/2004). Naast de totale gemeten sedimentatie per locatie zijn ook de absolute hoeveelheden van diverse gemeten sedimentfracties gegeven. Rechtsboven: de relatieve aandelen van verschillende sedimentfracties per locatie.

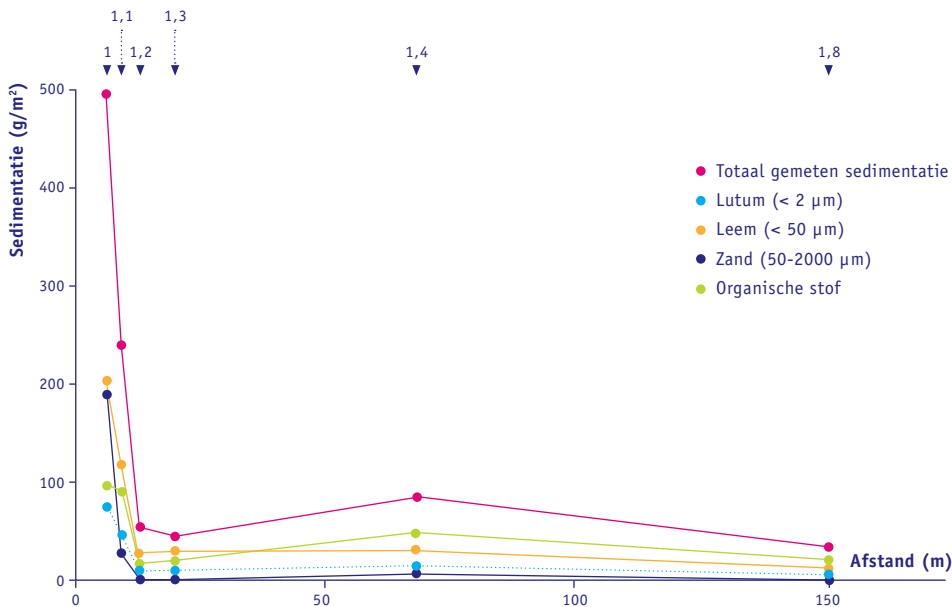
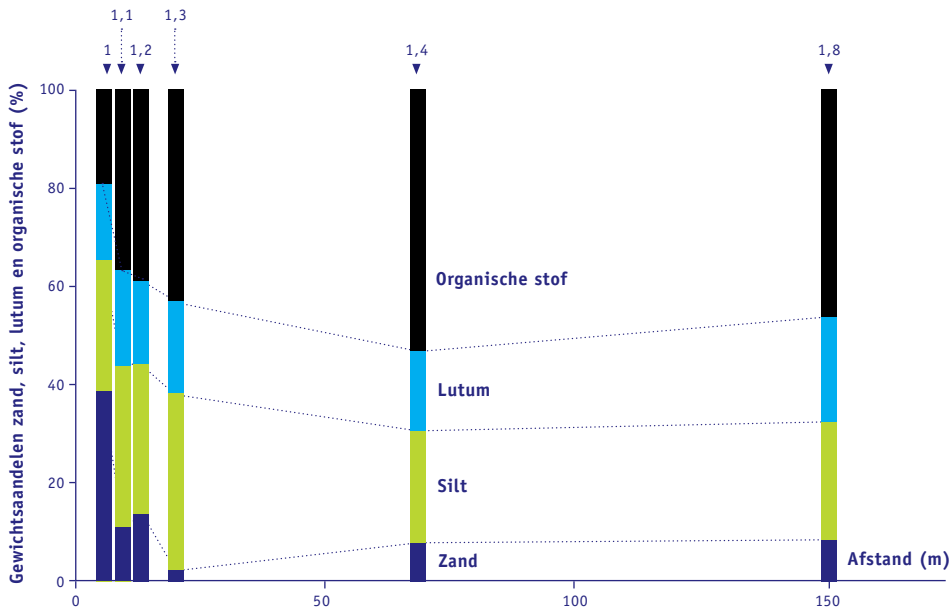




## Fig 2.29 DE ONDERGROND EN RECENTE SEDIMENTAFZETTING LANGS DE REEST

Onder: een profiel van de ondergrond loodrecht op de Reest (bedding uiterst links) bij de Havixhorst met daarin aangegeven de terreinhoogte, de locaties van slibmatten en de grondwaterspiegel tijdens het uitvoeren van de grondboringen. Rechtsonder: de corresponderende sedimentatiemetingen met de slibmatten (seizoen 2003/2004). Naast de totale gemeten sedimentatie per locatie zijn ook de absolute hoeveelheden van diverse gemeten sedimentfracties gegeven. Rechtsboven: de relatieve aandelen van verschillende sedimentfracties per locatie.





---

Uiteraard kan het water ook veel fijnere sedimenten bevatten die bij een afnemende stroomsnelheid makkelijk in transport kunnen blijven. Afzetting van deze, kleiige en siltige fracties onder rustige stromingscondities is vooral een kwestie van tijd. De valsnelheid van sedimentdeeltjes in een waterkolom is kwadratisch afhankelijk van de diameter van die deeltjes. Zeer kleine sedimentdeeltjes hebben dus zeer lange tijd nodig om te bezinken. Het proces van vlokvorming (waarbij deeltjes in rustig water aggregeren tot vlokken die vele malen de diameter van individuele deeltjes hebben) bespoedigt echter wel de sedimentatie. De patronen in de hoeveelheid afgezet fijn materiaal zijn vooral gerelateerd aan de morfologie van het oppervlak. Hoe lager de locatie, hoe groter de waterkolom en hoe meer sediment. Bovendien blijven lage plaatsen het langste nat en is er dus het meeste tijd beschikbaar om zelfs de fijnste fracties te laten bezinken.

In de praktijk spelen de verschillende ruimtelijke trends in sedimentatie door elkaar heen, hetgeen geïllustreerd kan worden met [Figuren 2.28](#) en [2.29](#). In deze figuren is een topografisch profiel van een beekdal met veel reliëf, het Dommeldal, en een profiel van een beekdal met weinig reliëf, het Reestdal, te zien. De oriëntatie van de profielen is loodrecht op de bedding van de beek. Op de gemarkeerde locaties is de sedimentatie tijdens een hoogwaterperiode gemeten. Van de opgevangen sedimentmonsters is niet alleen de hoeveelheid bepaald, maar ook de korrelgroottesamenstelling.

In de [Figuren 2.28](#) en [2.29](#) is de trend van afnemende sedimentatie met toenemende afstand tot de bedding van de beek te zien. In het topografisch profiel van het Reestdal ([Fig. 2.29](#)) is deze trend het duidelijkst te zien. Op de oever van de beek wordt vijf tot tien keer zoveel sediment afgezet als in de dalvlakte. Het topografisch profiel door het Dommeldal ([Fig. 2.28](#)) laat zien dat op de vier meetlocaties dicht bij de geul niet of nauwelijks sediment is afgezet. De waterstand tijdens de piekafvoer was lager dan de oeverwal. Via een laagte in de oeverwal stroomopwaarts van het profiel is het beekdal wel geïnundeerd. Beeksystemen doen qua gemiddelde oeverwalsedimentatie tijdens hoogwater niet onder voor grote rivieren (Maas *et al.*, 2003). In de profielen is ook zichtbaar dat de laagtes in de dalvlakte meer sediment invangen dan de omliggende dalvlakte. Het duidelijkst is dit ook weer te zien in het profiel van het Reestdal, waar in de laagte achter de oeverwal de totale gemeten hoeveelheid sedimentatie op de dalvlakte het hoogst is. In het profiel van de Dommel is een ander voorbeeld te zien van hoe de morfologie van de

dalvlakte de sedimentatie beïnvloed. Ter hoogte meetlocatie 2.7 ligt, in het laagste deel van het dal, een watergang waarlangs de aan- en afvoer van inundatiewater plaatsvindt. Langs deze watergang wordt meer fijn sediment afgezet dan in andere delen van het dal. Verder is ook de trend van sterk afnemende zandgehalten met toenemende afstand tot de beek in beide profielen duidelijk te zien. Zowel langs de Dommel als de Reest is het gewichtpercentage van het fijne klastische materiaal (silt en lutum) in het sediment circa 40%.

De verhouding tussen silt en lutum varieert per beekstelsysteem en is afhankelijk van het landschap en de textuur van de afzettingen die door de beek worden aangesneden. Veel beken hebben voornamelijk een zandige ondergrond en het is dan de vraag of er wel lemig of kleiig materiaal voor transport en afzetting beschikbaar is. Voor heuvellandbeken ligt dat anders, daar is juist veel fijn materiaal (löss) beschikbaar voor opname en afzetting door de beek. Ook in stuwwallen komen leem- en kleihoudende lagen voor die door beken worden aangesneden. In vergelijking met de uiterwaarden langs de grote rivieren echter, wordt in beekdalen verhoudingsgewijs weinig fijn klastisch materiaal in de dalvlakte afgezet.

Uit metingen blijkt dat een groot deel van het sediment dat in beekdalen wordt afgezet uit fijn organisch materiaal bestaat. Langs de Dommel en de Reest blijkt dat dit op de meeste locaties 40 tot 50% bedraagt van het gewicht van het na hoogwater in de dalvlakte afgezette sediment. Vergelijkbare waarden zijn ook gemeten in andere beekdalen. De oorzaak van deze hoge gehalten aan organische stof is dat in de ondergrond en langs de flanken van beekdalen veel humushoudende en organische lagen voorkomen die door de beek geërodeerd, getransporteerd en opnieuw afgezet kunnen worden. Het Reestdal is over de hele breedte gevuld met veen (Fig. 2.29). De ondergrond van het Dommeldal is sterk gelaagd opgebouwd met afwisselend klei-, zand- en veenlagen.

### De relatie tussen morfodynamiek en het ecosysteem

Op verschillende manieren heeft sedimentatie invloed op vegetatie door het creëren van verschillende standplaatscondities. Voor bijvoorbeeld stroomdalgraslanden op oeverwallen langs de Dinkel zijn deze relaties uitvoerig onderzocht door Hommel *et al.* (1996) en Wolfert *et al.* (2002). Allereerst zorgen de ruimtelijke verschillen in sedimentatie voor morfologische ontwikkeling van het overstromingsgebied. De hieruit resulterende verschillen in hoogteligging zorgen voor verschil-

---

len in overstromingsduur en grondwaterhydrologie. Voorts zorgen ruimtelijke verschillen in textuur van het afgezette sediment voor substraatdiversiteit. Verder is er in milieus met een hoge sedimentatiesnelheid natuurlijk ook de directe invloed van periodieke begraving van planten onder sedimentpakketten die in één keer worden afgezet. Naast bovengenoemde fysische invloeden, bestaat een ander belangrijk effect van sedimentatie uit de toevoer van nutriënten, die vooral deel uitmaken van de lutum- en organische-stof-fractie van het sediment.

In een vergelijkende studie door Runhaar & Jansen (2004) is op vijf verschillende beekdalallocaties langs de Dommel, de Overijsselse Vecht, de Reest en de Drentsche Aa, het effect van inundaties op de vegetatie onderzocht. De studie richtte zich op de vraag in hoeverre overstroming met voedselrijk oppervlaktewater uit de beek leidt tot eutrofiëring van schrale beekbegeleidende vegetaties, en wat de belangrijkste aanvoerbron voor nutriënten is, het inundatiewater of het sediment. Uit het onderzoek kwam naar voren dat het op de dalvlakte afgezette sediment de belangrijkste bron van nutriënten is en niet de in het water opgeloste voedingsstoffen. De productiviteit van de vegetatie is gecorreleerd aan variabelen die samenhangen met sedimentatie, zoals gehalte aan zware metalen, fosfor en kalium in de bodem, en aan het aandeel klei en leem. Dit is in lijn met eerder onderzoek in verschillende beekdalgraslanden door Olde Venterink (2000). Het blijkt dat (eutroof) inundatiewater niet of nauwelijks de bodem binnendringt, maar oppervlakkig wordt afgevoerd. Er zijn aanwijzingen dat ook kwel daarbij een rol speelt en van belang kan zijn voor het instandhouden en versterken van matige voedselrijke en voedselarme vegetatietypen.

Natuurlijke morfodynamische beekprocessen zorgen voortdurend voor een rijke diversiteit aan terreinvormen en substraten. Deze zogenaamde interne heterogeniteit van het beekdalecosysteem vergroot de biodiversiteit en de overlevingskansen van soorten bij externe verstoringen (Vos *et al.*, 2007). Voor een deel is deze landschapsdiversiteit ontstaan door processen uit het verleden die nu in het door mensen beheerste beekdalsysteem niet meer voorkomen. Dit is een reden om zeer bewust om te gaan met de producten van deze processen.

Voor een ander deel is de huidige landschapsdiversiteit in evenwicht met de huidige beekprocessen en is dus nieuwvorming mogelijk van vormen en substraten. Dit betekent dat morfodynamische processen gebruikt kunnen worden als motor

---

om de heterogeniteit van het beekdalecosysteem te vergroten. Geomorfologisch beekherstel versterkt de natuurlijke morfodynamiek van het systeem. Die is voor elk beekstelsysteem anders, afhankelijk van de landschappelijke en hydrologische condities in het stroomgebied.





# H3 GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL IN DE PRAKTIJK

### 3.1 STAPPENPLAN VOOR HET ONTWERPPROCES

Geomorfologisch beekherstel is in de inleiding van dit handboek gedefinieerd als het opnieuw vormgeven van de bedding van een beek, zodanig dat de dimensies en het patroon van de herstellende bedding passen bij de afvoer en de natuurlijke terreingesteldheid. Het ontwerpen van een nieuwe beekloop is te structureren als een stapsgewijs proces (Fig. 1.1) dat hieronder is beschreven. Aan het ontwerpproces gaat de keuze van het te herstellen traject vooraf. De *trajectkeuze* zal in dit stadium vaak afhangen van de ligging van infrastructuur, de mogelijkheden voor grondverwerving, bestemmingplannen en bestuurlijke grenzen.

In stap 1 van het ontwerpproces, de ruimtelijke analyse, wordt de aardkundige en historische ruimtelijke context van het hersteltraject in beeld gebracht. Deze analyse kan aanleiding geven om de grenzen van het aanvankelijk gekozen traject bij te stellen. Wanneer bijvoorbeeld een klein deel van het traject een afwijkende geomorfologische context heeft, waardoor andere herstelmaatregelen nodig zijn, kan het efficiënter zijn dit deel (later) in een apart project aan te pakken, waarin meer aandacht geschonken kan worden aan de specifieke ruimtelijke kwaliteiten in dit deel.

#### Stap 1 Ruimtelijke analyse

Een oriëntatie op de landschappelijke en historische context van het te herstellen beektraject is de eerste stap in het ontwerpproces. Drie typen kaarten zijn hierbij essentiële informatiebronnen: (1) de Geomorfologische kaart van Nederland (1:50.000) (Koomen & Maas, 2004; Fig. 3.1); (2) de Bodemkaart van Nederland (1:50.000) (De Vries *et al.*, 2003; Fig. 3.2); (3) historische topografische kaarten (Fig. 3.3).

De Geomorfologische kaart van Nederland (digitaal beschikbaar via Alterra) geeft gedetailleerde landsdekkende informatie over de vorm, ontstaanswijze en ouderdom van reliëfeenheden. Een analyse van deze kaart moet antwoord geven op de onderstaande vragen.

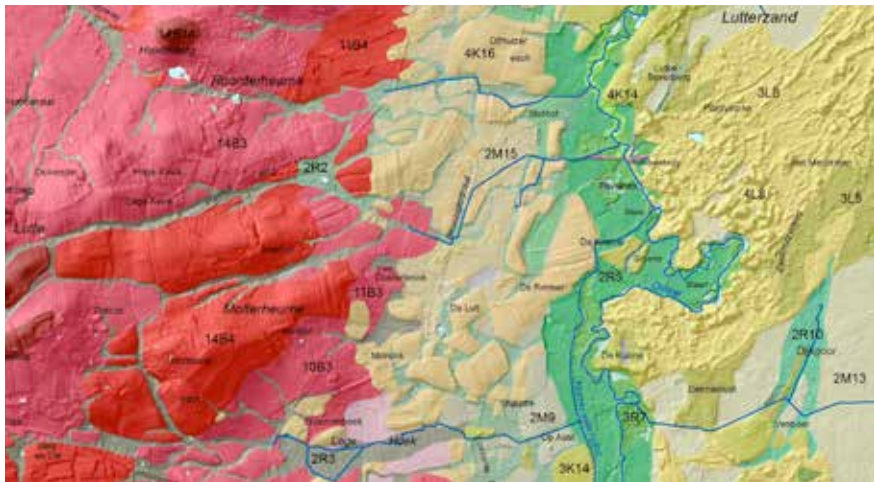
- Met welk type beek hebben we te maken (volgens de landschappelijke indeling van [paragraaf 2.1](#) en [Bijlage 2](#))?
- Ligt de beek ingesneden in het landschap of heeft zij van oorsprong een natuurlijke overstromingsvlakte?

Indien de beek een overstromingsvlakte heeft zijn de volgende vragen van belang.

- Hoe breed is de overstromingsvlakte en hoe, door welke geomorfologische eenheden, wordt zij begrensd?
- Zijn er oude beddingen te herkennen in de vlakte en, zo ja, welk patroon hebben die?

**Fig 3.1 GEOMORFOLOGISCHE KAART**

*Uitsnede van de Geomorfologische kaart van Nederland waarop een deel van het Dinkeldal te zien is.*

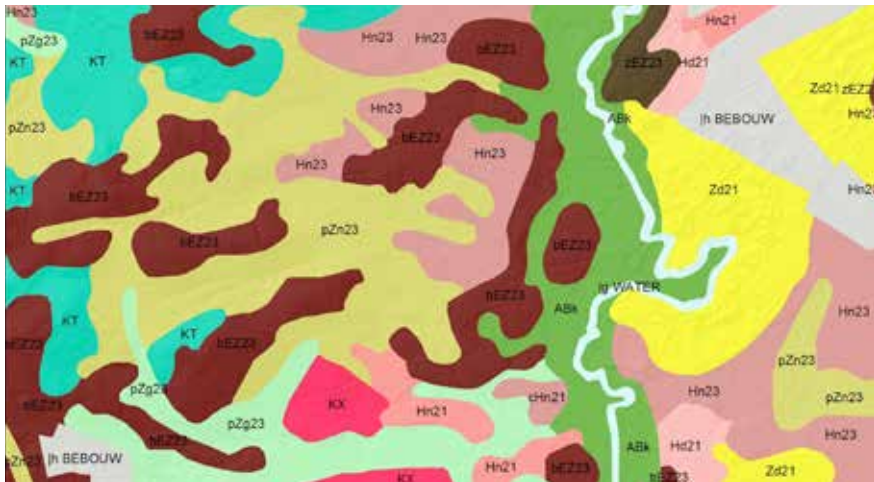


### Legenda

- |  |   |
|--|---|
| 14B14 Stuwwalerosierestheuwel                      | 1R1, 2R1 Dalvormige laagte, met veen                    |
| 11B3, 14B3, 10B3 Hoge stuwwal                      | 3K25 Rivieroevenwal                                     |
| 14B4, 11B4, 10B4 Hoge stuwwal, bedekt met dekzand  | 2R2 Dalvormige laagte, zonder veen                      |
| 3R3, 11/10R3, 2S3, 2R3, 11/10S3, 11/10S1 Droog dal | 2R4 Beekdalbodem met veen                               |
| 2M2, 2M3 Grondmorenevlakte                         | 3R5, 2R5 Beekdalbodem, zonder veen, ref. laaggelegen    |
| 4K14, 3K14 Dekzandrug (+/- oud bouwlanddek)        | 3R7, 2R7 Beekdalbodem met meanderuggen en geulen        |
| 4K16, 3K16 Gordeldekzandrug (+/- oud bouwlanddek)  | 3R10 Geul van een vlechtend afwateringsstelsel          |
| 4L5, 3L5 Dekzandruggen (+/- oud bouwlanddek)       | 2R11 Geul van meanderend afwateringsstelsel             |
| 3L6 Gordeldekzandvelingen (+/- oud bouwlanddek)    | 2M24 Beekoverstromingsvlakte                            |
| 2M9 Vlakke van ten dele verspoelde dekzanden       | 4L8, 3L8 Lage landduinen = bijbehorende vlakten/laagten |
| 2M13 Dekzandvlakte                                 | 2M18 Stufzandvlakte                                     |
| 2M15 Gordeldekzandvlakte                           | 2M48 Vlakke ontstaan door afgraving of egalatie         |
| 3N3 Laagte met randwal (incl. pingo restant)       | D Hoge dijk   |
| 3N4 Laagte zonder randwal, moerassig               | Water   |
| 3N5 Laagte zonder randwal, niet moerassig          |   |

**Fig 3.2 BODEMKAART VAN NEDERLAND**

Uitsnede van de Bodemkaart van Nederland waarop een deel van het Dinkeldal te zien is. De uitsnede laat hetzelfde gebied zien als [Figuur 3.1](#).



**Legenda**

 Veldpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand	 Beekeerdgronden; lemig fijn zand
 Zeer ondiepe keileem, potklei, enz	 Gooreerdgronden; lemig fijn zand
 Overige kleigronden	 Laarpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand
 Duinvaaggronden; leemarm en zwak lemig fijn zand	 Hoge zwarte enkeerdgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand
 Veldpodzolgronden; lemig fijn zand	 Hoge zwarte enkeerdgronden; lemig fijn zand
 Haarpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand	 Water
 Kleilge beekdalgronden	 Bebouwing
 Hoge bruine enkeerdgronden; lemig fijn zand	

De Bodemkaart van Nederland (digitaal beschikbaar via Alterra) geeft gedetailleerde landsdekkende informatie over bodemtypes en de opbouw, de textuur en de ontstaanswijze van de bovenste laag van de ondergrond (tot minimaal 1,2 m diepte). Een analyse van deze kaart moet antwoord geven op de onderstaande vragen.

- Wat is de textuur (veen, klei, leem, zand of grind) en opbouw (gelaagdheden en afwisseling van texturen) van de ondergrond in het beektraject?
- Welke bodemtypes komen voor in het beektraject, en bevatten die bodemtypes verkitte lagen/horizonten? (Verkitten horizonten komen met name voor in podzolgronden en brikgronden.)

---

Historische topografische kaarten kunnen een beeld geven van beekpatronen die bestonden voor de grootschalige menselijke ingrepen, zoals ruilverkavelingen. De landsdekkende topografische kaarten uit de 19<sup>e</sup> eeuw zijn zeer geschikt voor een analyse van historische beekpatronen. Het is belangrijk om te beseffen dat historische beekpatronen niet natuurlijk hoeven te zijn. Al ver voor de 19<sup>e</sup> eeuw werden beeklopen door mensen beïnvloed, bijvoorbeeld om watermolens van voldoende water te voorzien. Een ander belangrijk punt is dat historische kaarten weliswaar patrooninformatie geven, maar doorgaans weinig tot geen informatie over morfodynamiek. Vaak is op de historische kaart een slingerende beek te zien, maar blijft onduidelijk of er sprake was van meanderen: verplaatsing van bochten in de loop der tijd. Analyses van tijdreeksen van historische kaarten kunnen eventueel wel inzicht geven in veranderingen in patroon. Ook kunnen verschijnselen als afgesneden bochten, of gekarteerde zandbanken wel een idee geven van morfodynamiek. Een analyse van historische kaarten moet gericht zijn op het beantwoorden van de onderstaande vragen.

- Waar lag de beekbedding voor grootschalige menselijke ingrepen, en welk patroon had zij?
- Welke aanwijzingen voor morfodynamiek en voor menselijke invloed zijn uit de kaart(en) af te leiden?

Eventueel wordt, op basis van de ruimtelijke analyse in deze stap, het aanvankelijk gekozen hersteltraject bijgesteld, zodat een in aardkundig/historisch opzicht logisch begrensd traject ontstaat, waarin een redelijk uniforme set van herstelmaatregelen van toepassing zal zijn.

### Stap 2 Patroonvoorspelling

Na de analyse van de landschappelijke en historische context van het te herstellen beektraject (stap 1) moet het beekpatroon worden vastgesteld dat past bij de huidige condities of bij de condities die in de nabije toekomst te verwachten zijn. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de theorie uit [paragraaf 2.4](#) en vooral het stabiliteitsdiagram in [Figuur 2.10](#).

Om het beektraject te kunnen plotten in het stabiliteitsdiagram moet een aantal gegevens worden verzameld. Ten eerste moet de textuur ( $D_{50}$ ) van het bedding-

materiaal in de herstellende beek bekend zijn. Het beste kan deze variabele bepaald worden op basis van korrelgrootteanalyses van sedimentmonsters uit het veld. Dit kunnen grijpmonsters van de bedding van de beek zijn. Eventueel kunnen boringen in het nieuwe traject gezet worden om monsters te verzamelen van het toekomstige beddingmateriaal. Als veldgegevens niet verzameld kunnen worden, kan eventueel een schatting van de textuur gemaakt worden op basis van de bodemkaart. Ten tweede moet de geulvormende afvoer bepaald worden uit een langjarige meetreeks. Benodigd is de toekomstige geulvullende afvoer ( $Q_{bf}$ ) of, als deze niet beschikbaar is, de gemiddelde jaarlijkse piekafvoer ( $Q_{af}$ ) (zie [paragraaf 2.2](#) voor inschatting van de toekomstige  $Q_{bf}$ ). Hierbij wordt idealiter rekening gehouden met eventuele toekomstige veranderingen in de afvoerverdeling door hydrologische maatregelen in het stroomgebied (bijvoorbeeld maatregelen om meer water vast te houden dichtbij de bron). Ten derde moet het dalverhang in het toekomstige traject worden vastgesteld. Dit kan in het veld gemeten worden, maar kan ook bepaald worden op basis van hoogtes uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN).

**Fig 3.3 TOPOGRAPHISCH MILITAIRE KAART**

Uitsnede van de Topographisch Militaire Kaart van Nederland (periode 1850-1864) waarop een deel van het Dinkeldal te zien is. De uitsnede laat hetzelfde gebied zien als [Figuren 3.1](#) en [3.2](#).



---

Indien in stap 1 gebleken is dat langs het toekomstige beektraject belangrijke landschappelijke verschillen bestaan, moet hiermee rekening gehouden worden door het beektraject in verschillende bereiken te verdelen en voor ieder traject afzonderlijk het dalverhang en de textuur van het beddingmateriaal te bepalen.

Op basis van bovenstaande gegevens kan het potentiële specifieke stromingsvermogen berekend worden en kan het toekomstige beektraject (eventueel per bereik) geplot worden in het stabiliteitdiagram (Fig. 2.10).

### Stap 3 Evaluatie van het voorspelde geulpatroon

De positie van het beektraject in het stabiliteitdiagram geeft een indicatie van het toekomstige patroon en de te verwachten morfodynamiek. Het is echter van belang deze voorspelling te evalueren met de gegevens die in stap 1 zijn verkregen. De belangrijkste reden dat deze evaluatie nodig is, is gelegen in het feit dat de scheidingslijnen in het diagram ondergrenzen vertegenwoordigen. Dit betekent dat wanneer een beektraject in het veld 'lateraal stabiel, geen banken' plot, het zeer waarschijnlijk is dat de beek niet zal gaan meanderen, omdat het vermogen beneden de ondergrens voor meanderen ligt.

Wanneer een beektraject in het veld 'meanderend met scrolls' plot, behoort meanderen wel tot de mogelijkheden, maar kunnen bepaalde omstandigheden dit verhinderen. Die omstandigheden, die dus stabiliteitsverhogend werken, zijn grotendeels in stap 1 in beeld gebracht. Het gaat om de volgende factoren: verkitte lagen in de oever, diepe insnijding van de beekbedding en diepe doorworteling van de oever in bossen. Verder is het van belang de patroonvoorspelling te vergelijken met historische (kaart-)gegevens en bij verschillen een verklaring hiervoor te zoeken. Zijn er belangrijke verschillen in afvoer, gradiënt, beddingmateriaal of oeverstabiliteit, tussen de historische en de toekomstige herstelde beek?

Op basis van de evaluatie kunnen eventueel de voorspellingen omtrent geulpatroon en morfodynamiek worden bijgesteld. Het gaat hierbij vaak om een neerwaartse bijstelling, dus in de richting van meer stabiliteit en minder morfodynamiek, op basis van specifieke lokale omstandigheden. Wanneer bijvoorbeeld de herstelde beek diep in het landschap ligt, en geen eigen overstromingsvlakte heeft die bij piekafvoer onderloopt, zijn de oevers zo hoog dat ze moeilijk erodeerbaar worden. Het erosieproces wordt als het ware gesmoord in het door oevererosie

overvloedig vrijkomende materiaal. In dit geval is meer stabiliteit te verwachten voor de herstelde beek dan gesuggereerd wordt door het stabiliteitsdiagram. Dit laatste geldt ook bij het voorkomen van verkitte bodemlagen, zoals ijzeroerbanken en inspoelingshorizonten van podzols of brikgronden, en diep doorwortelde bodems in bossen.

Een belangrijke conditie die de oeverstabiliteit negatief kan beïnvloeden is kwel. Er zijn aanwijzingen dat kwel lokaal tot vorming van meanders kan leiden, terwijl de beek verder stabiel blijft (Eekhout *et al.* 2013). Voor de patroonevaluatie is het belangrijk om zich er rekenschap van te geven dat de omstandigheden met betrekking tot kwel in het verleden vaak heel anders waren dan nu: de huidige grondwaterstanden zijn veelal lager en het aantal locaties met kwel is sterk afgenomen.

#### Stap 4 Ontwerp van morfometrie

Bij vaststelling van de ontwerpbreedte en -diepte van de herstelde beek geldt als uitgangspunt dat *onderdimensioneren* beter is dan *overdimensioneren*. Bij onderdimensioneren, ten opzichte van de met morfometrische relaties vastgestelde breedte en diepte, krijgt de beek de gelegenheid om zelf het laatste beetje werk doen, en zal zodoende een natuurlijke morfologie ontstaan die past bij de afvoer en de terreinomstandigheden. Dit uitgangspunt speelt mee in de keuze van de formules waarmee de ontwerpdimensies worden bepaald. Voor zeer laag-dynamische situaties (bijvoorbeeld zeer laag potentieel specifiek stromingsvermogen in combinatie met veenondergrond) vervalt het uitgangspunt van onderdimensioneren, omdat in dat geval de beek te weinig vermogen heeft om de bedding zelf vorm te geven. Voor het vaststellen van de ontwerpbreedte moet een geschikte hydraulische-geometrie-relatie gekozen worden. De relatie voor berekening van de breedte heeft de volgende vorm:  $W = a Q^{0.5}$ , waarin  $W$  de breedte is,  $a$  een te bepalen coëfficiënt en  $Q$  de dominante of geulvormende afvoer. Voor  $Q$  kan de dezelfde afvoerwaarde genomen worden als die gebruikt is voor de patroonvoorspelling. In de keuze van coëfficiënt  $a$  moeten bedding- en oevermateriaal betrokken worden. Voor rivieren en beken met een zandige bedding ligt  $a$  doorgaans tussen 3,5 en 6,5 (paragraaf 2.5). Gezien de vaak relatief hoge oeverstabiliteit van Nederlandse beken en het bovengenoemde principe van licht onderdimensioneren kan voor coëfficiënt  $a$  het beste een waarde van ongeveer 4 gekozen worden. Voor grindige beddingen zijn waarden van 2 tot 3 van toepassing.



---

Voor het vaststellen van de ontwerpdiepte gaat de voorkeur uit naar toepassing van de vergelijking van Brownlie (1983) ([paragraaf 2.5](#)). Hiermee wordt de hydraulische straal berekend, die doorgaans een goede benadering is van de gemiddelde geuldiepte. Voor geulen met een lage breedte-diepte-verhouding is de hydraulische straal wat kleiner dan de geuldiepte. Voor toepassing van de Brownlie-formule moet ook de geulgradiënt bekend zijn. Aanbevolen wordt om de dalgradiënt, die al in stap 2 nodig was voor de patroonvoorspelling, als substituuut voor de geulgradiënt te gebruiken, aangezien de geulgradiënt in dit stadium van het ontwerp (waarin de sinuositeit van de geul nog niet is vastgelegd) nog onbekend is. Toepassing van de dalgradiënt leidt tot een lichte onderschatting van de hydraulische straal, en daarmee tot een lichte onderschatting van de geuldiepte. Dit is in overeenstemming met het principe van onderdimensioneren.

Voor toepassing van de Brownlie-formule zijn verder goede korrelgroottegegevens van het beddingsediment en een schatting van de geulvullende afvoer nodig, evenals de eerder in deze stap berekende geulbreedte. Korrelgrootte- en afvoergegevens zijn al in stap 2 verzameld en gebruikt. Mochten er toch belangrijke gegevens ontbreken (bijvoorbeeld de volledige korrelgrootteverdeling van het beddingsediment) dan is gebruik van een hydraulische-geometrie-formule een alternatief, wat een minder nauwkeurige schatting oplevert ([paragraaf 2.5](#)).

---



Als de voorspelling van geulpatroon en morfodynamiek, ook na kritische evaluatie en eventuele bijstelling (stap 3), aangeeft dat meanderontwikkeling plaats kan vinden, kunnen de meanderafmetingen (golflengte en amplitude) geschat worden met formules zoals gegeven [paragraaf 2.5](#). Deze formules hebben geen zeggingskracht voor situaties waarvoor niet is vastgesteld dat meanderen tot de mogelijkheden behoort. Aanbevolen wordt om door toepassing van verschillende relaties, genoemd in [paragraaf 2.5](#), een bereik te berekenen voor golflengte en amplitude. Hierbij worden bij voorkeur de relaties gebruikt die de geulbreedte als invoer hebben. Op basis van de maximale amplitude kan dan een bepaalde ruimte gereserveerd worden, terwijl het ontwerp gebaseerd wordt op gemiddelde waarden. Omdat de ontwerpbreedte via de hydraulische-geometrie-formule bewust conservatief wordt ingeschat, verdient het aanbeveling om voor toepassing van de relaties voor golflengte en amplitude eerst een ruimere inschatting van de breedte te maken om de maximale bereiken van golflengte en amplitude beter in beeld te brengen. Gegevens uit stap 1 kunnen gebruikt worden om de berekende bereiken te evalueren en bij te stellen. De maximaal berekende amplitude kan bijvoorbeeld niet de dalbreedte overschrijden.

Het dwarsprofiel dat via bovenstaande berekeningen verkregen wordt is een benadering van het profiel dat via natuurlijke geomorfologische processen zou ontstaan. In de huidige praktijk van beekherstel wordt vaak een zogenoemd tweefasenprofiel aangelegd: een beperkt zomerbed dat veelal ontworpen wordt om bepaalde gewenste stroomsnelheden te verkrijgen, en daaromheen een veel breder en ondieper winterbed dat ontworpen wordt om piekafvoeren van een bepaalde herhalingstijd te kunnen accommoderen. Een tweefasenprofiel zal nooit door natuurlijke geulvormende processen ontstaan en aanleg ervan past daarom niet in geomorfologisch beekherstel. Een natuurlijke situatie die enigszins lijkt op een tweefasenprofiel is die van een beekbedding in een ruimer beekdal. De vorming van een natuurlijk beekdal vindt echter plaats door geomorfologische processen die op een veel langere tijdschaal opereren dan de processen die leiden tot vorming van de beekbedding. Aanleg van een tweefasenprofiel leidt, vanwege het brede winterbed, vaak tot schade aan de natuurlijke geomorfologie van het beekdal. Welke geomorfologische processen op zullen gaan treden in een tweefasenprofiel is moeilijk te voorspellen. Dit hangt sterk af van de precieze vormgeving en dimensionering van het profiel.

---

## Stap 5 Ruimtelijke inpassing

In het proces van het ruimtelijk uitwerken van het geulontwerp spelen de gegevens uit stap 1 een cruciale rol. Het eerste uitgangspunt is dat de herstelde beekloop in het natuurlijke beekdal of de natuurlijke beekoverstromingsvlakte moet komen te liggen. De herstelde beekloop mag niet hogere terreinvormen, zoals dekzandruggen, doorsnijden. Het kan wel dat de herstelde beekloop direct langs deze hogere vormen loopt en deze in buitenbochten aansnijdt, zeker wanneer in het landschap te zien is dat dit in het verleden ook het geval was. Het tweede uitgangspunt is dat oude verlaten beeklopen, waar mogelijk, worden opgenomen in het ontwerp. Hierbij geldt wel dat de oude beeklopen moeten passen bij de in stap 4 bepaalde morfometrische ontwerpkenmerken. Op veel plaatsen in Nederland liggen bijvoorbeeld verlaten meanderbochten die stammen uit het einde van de laatste ijstijd. Deze meanderbochten zijn gevormd onder condities die sterk afwijken van de huidige en passen daarom niet in een nieuw geulontwerp. In het geval van herstel van een meanderende beek, kan er ook voor gekozen worden bepaalde oude meanders niet op te nemen in de nieuwe loop, omdat verlaten meanders natuurlijke elementen zijn in het dal van een meanderende beek, met eigen landschappelijke en ecologische waarden. Het derde uitgangspunt in ruimtelijk geulontwerp is dat er voldoende ruimte gereserveerd moet worden voor morfodynamische processen. Gebaseerd op de voorspellingen van geulmorfometrie en -dynamiek, en rekening houdend met de onzekerheden hierin, dient een veiligheidsmarge opgenomen te worden om te voorkomen dat spoedig ingegrepen moet worden om de herstelde morfodynamiek te beperken.

Behalve ruimtelijke inpassing op basis van bovenstaande geomorfologische overwegingen, omvat deze stap ook inpassing in de bestaande infrastructuur, zoals wegen, kades, leidingen, etc. In het algemeen geldt dat de berekende morfometrische kenmerken voor de herstelde beek sturend moeten zijn bij het ruimtelijk uitwerken van een te herstellen beektraject, waarbij lokaal afwijkingen nodig kunnen zijn om optimaal aan te sluiten bij de bestaande geomorfologie en infrastructuur. Dit houdt onder meer in dat rekening gehouden moet worden met de veiligheidsnormen voor de stabiliteit van dijken, kades en kunstwerken. Anderszijds kan ruimtelijke inpassing ook betekenen dat de bestaande infrastructuur aangepast moet worden. Zo moet bijvoorbeeld voorkomen worden dat bruggen en taluds bij een gewijzigde afvoercapaciteit van de beek hydraulische obstakels in het beekdal worden. In stap 6 zullen dergelijke hydraulische effecten worden ge-

toetst, maar het is goed in deze stap al te anticiperen op verwachte knelpunten. Taluds kunnen bijvoorbeeld meer doorlatend gemaakt worden en weinig gebruikte wegen kunnen overstroombaar worden uitgevoerd. Ten slotte kan het in stedelijke beektrajecten nodig zijn de geomorfologische ontwerpprincipes (groten)deels los te laten om voldoende afvoercapaciteit te kunnen realiseren. In de herstelplannen voor de Overijsselse Vecht, bijvoorbeeld, is ter plaatse van woonkernen de natuurlijke morfodynamiek ondergeschikt aan de afvoercapaciteit en is derhalve de bedding in deze trajecten ruimer gedimensioneerd.

### Stap 6 Hydraulische en hydrologische toetsing

De voorlaatste stap in het ontwerpproces is het toetsen van de effecten van de beekherstelmaatregelen op de hydraulica en hydrologie. Allereerst moet de afvoercapaciteit van de herstelde beek vastgesteld worden. Hiervoor kunnen hydraulische modellen, zoals SOBEK, ingezet worden. Een goede inschatting van de hydraulische ruwheid (paragrafen 2.7 en 2.9) is hiervoor cruciaal. Naar aanleiding van de toetsingsresultaten kunnen aanvullende maatregelen (bijvoorbeeld kades) ontworpen worden om eventuele overlast te beperken. Ook is het van belang om op stroomgebiedsniveau met hydrologische modellen het gedrag van afvoerpieken in de herstelde situatie te onderzoeken. De vraag hierbij is vooral in hoeverre het herstelproject vertragend en afvlakkend werkt op afvoerpieken en of in verband hiermee buiten het herstelde traject extra maatregelen nodig zijn. Het verdient ook aanbeveling om in deze stap de effecten op grondwaterstanden, met name tijdens perioden van lage afvoer, modelmatig in kaart te brengen. Veranderende grondwaterstanden kunnen immers effecten hebben op natuur en landgebruik langs de beek.

Om vegetatiesuccessie, en de daarmee gepaard gaande toename van de hydraulische ruwheid in het doorstroomprofiel, te kunnen faciliteren is het vaak nodig om extra hydraulische ruimte (afvoercapaciteit) in het ontwerp op te nemen. Wanneer het ontwerp uitgaat van een relatief 'gladde' vegetatie, kan vegetatiesuccessie leiden tot ongewenste opstuwing van de waterstanden die tot calamiteiten kan leiden. De resultaten van de hydraulische toetsing kunnen gebruikt worden om het ontwerp zodanig te optimaliseren dat de gevolgen van vegetatiesuccessie kunnen worden opgevangen. Het is hierbij belangrijk om niet alleen te toetsen op de verwachte eindstadia van de successie, maar om ook (mogelijk hydraulisch ruwere) tussenstadia in de toetsing te betrekken. Iets soortgelijks geldt voor de effecten

---

van de hydraulische ruwheid van beddingvormen, die net na aanleg, wanneer veel sediment vrijkomt, tijdelijk anders van aard kunnen zijn dan na langere tijd.

Gekoppeld aan een hydraulische toetsing kan een berekening van de verandering in sedimenttransportcapaciteit (paragraaf 2.7) door het herstelproject ook onderdeel van deze stap in het ontwerpproces zijn. Op deze wijze kan het potentiële effect op benedenstroomse zandvangen bepaald worden. Met behulp van de Shields-parameter (paragraaf 2.7) kunnen sedimentmobiliteit en beddingvormen voorspeld worden (paragraaf 2.8). Samen met berekende stroomsnelheden geven deze gegevens inzicht in de toekomstige aquatisch-ecologische condities.

### Stap 7 Het plannen van monitoring en beheer

In de huidige praktijk maken monitoring en beheer doorgaans geen deel uit van het beekherstelproject. Vaak wordt pas na projectuitvoering hierover nagedacht. In het slechtste geval vindt geen monitoring plaats en wordt het reguliere beheer gecontinueerd. Dit is onwenselijk, want na uitvoering van de maatregelen moet zich immers nog een morfologisch evenwicht in gaan stellen en het beheer oefent invloed uit op de snelheid en richting van de morfologische ontwikkelingen. Bovendien kan systematische monitoring belangrijke informatie opleveren waarmee het beheer bijgestuurd kan worden. Verder is monitoring essentieel in adaptief rivier- en beekbeheer en het daarbij behorende cyclische ontwerpproces, waarin monitoringsgegevens uit eerdere deelprojecten gebruikt worden om het geulontwerp voor nieuwe deelprojecten te optimaliseren.

Vanwege de relaties met het ontwerp(proces) is er alle reden om tijdig aandacht te besteden aan het vormgeven van monitoring en beheer. Het opstellen van een monitoring-en-beheerplan kan daarom beter gezien worden als het sluitstuk van het ontwerpproces, dan als begin van de fase na realisatie. In paragraaf 3.3 wordt dieper ingegaan op monitoring en beheer in geomorfologisch beekherstel.

## 3.2 UITVOERING EN FASERING VAN MAATREGELEN

Het heeft de voorkeur om het ontwerpproces voor een zo lang mogelijk, geomorfologisch min of meer uniform, beektraject in één keer te doorlopen. Het voordeel hiervan is een efficiënter ontwerpproces en een betere afstemming van de maatregelen in het hersteltraject. Bovendien is op deze manier een integrale beoordeling van het totaaleffect van de maatregelen mogelijk. De realisatie van het ontwerp



kan vervolgens gefaseerd plaatsvinden, afhankelijk van welke kansen zich voordoen. In het algemeen kan de *gefaseerde realisatie* van maatregelen in het traject het beste van stroomafwaarts naar stroomopwaarts plaatsvinden. Het voordeel hiervan is dat sediment dat vrijkomt in projecten stroomopwaarts, stroomafwaarts ingevangen wordt in andere projecten, alwaar het bij kan dragen aan morfodynamiek en aanpassing van de aangelegde bedding aan de natuurlijke condities.

Geomorfologisch beekherstel vraagt in principe om *ontstuwung*. Stuwen reduceren het verhang en dus het potentieel voor geomorfologische processen in een beek. Daarnaast belemmeren stuwen vaak het beddingtransport van sediment dat geomorfologische processen stuurt. Idealiter gaat de uitvoering van geomorfologisch beekherstel in een bepaald beektraject dus gepaard met gelijktijdige ontstuwung. De lengte van het in één fase te herstellen traject kan dan bepaald worden door de ligging van stuwen. Het hersteltraject kan bijvoorbeeld bestaan uit twee stuwpannen, waarbij de tussenliggende stuw wordt verwijderd, gelijktijdig met het aanleggen van een langere loop met een geringer verhang. De lengte van een in één fase te herstellen traject wordt ook beïnvloed door verschillen in terreinverhang,

---

bedding- en oevermateriaal en beekdalgeomorfologie in de lengterichting langs de beek. Het traject moet zich kenmerken door uniforme condities. Wanneer meanders tot de mogelijkheden behoort moet het hersteltraject minimaal één meandergolflengte lang zijn.

Een gefaseerde realisatie sluit aan bij de principes van adaptief rivier-/waterbeheer (paragraaf 3.3) en heeft als voordeel dat ervaringen uit eerdere deelprojecten meegenomen kunnen worden in de uitvoering van nieuwe deelprojecten in een hersteltraject. Met de monitoringsgegevens van eerdere deelprojecten kan het stappenplan voor ontwerp (paragraaf 3.1) opnieuw doorlopen worden om het geulontwerp voor nieuwe deelprojecten te optimaliseren. Een dergelijk *cyclisch ontwerp*-proces biedt kansen om natuurlijke processen zo efficiënt mogelijk te gebruiken voor beekherstel.

In het algemeen zullen Nederlandse beken een relatief lage morfodynamiek vertonen, wat betekent dat de beek er zeer lang over kan doen om zelf een bij de condities passende natuurlijke morfologie te creëren. Dit gegeven ligt ten grondslag aan het principe van (licht) onderdimensioneren, waarmee de beschikbare stromingsenergie zoveel mogelijk wordt benut om morfodynamische processen te stimuleren die de beek vorm geven. De geringe morfodynamische potenties betekenen ook dat spontane bochtvorming vanuit een rechte, gekanaliseerde loop, indien dat al plaatsvindt, een zeer langzaam proces is (bijvoorbeeld Eekhout *et al.*, 2013). Om deze reden is het beter om, ook als potenties voor meanders aanwezig zijn, bochten aan te leggen. Na de aanleg van een nieuwe loop is het van belang om de oude loop volledig af te sluiten. Om de piekafvoeren beter te kunnen verwerken wordt er soms voor gekozen de oude bedding parallel aangetakt te laten op de nieuwe loop, al dan niet met een drempel erin. Vanuit het oogpunt van geomorfologisch beekherstel is dit onwenselijk, omdat zo de morfodynamiek die juist bij hogere afvoeren optreedt en die ervoor zorgt dat een natuurlijke morfologie ontstaat, geremd wordt.

Het principe om de beek zelf het laatste stukje van de uitvoering te laten verrichten, betekent dat direct na aanleg verhoogde morfodynamiek optreedt en dat sediment vrijkomt uit het herstelde traject. Ook zal de afvoercapaciteit van het herstelde traject maar langzaam toenemen. Het is dus zaak om de uitvoering, inclusief de morfologische aanpassing door de beek zelf, ruim te plannen en even-

tueel tijdelijke voorzieningen te treffen om overlast te voorkomen. Een gefaseerde realisatie, zoals hierboven omschreven, biedt het voordeel dat de eventuele overlast beter beheersbaar is dan wanneer geomorfologisch beekherstel over een lang traject in één keer wordt uitgevoerd.

### 3.3 NAAR ADAPTIEF BEEKBEHEER VIA MONITORING EN EVALUATIE

De procesgeomorfologische benadering in beekherstel is erop gericht met herstel van natuurlijke geomorfologische processen de beek en het beekdal terug te brengen in een nieuw dynamisch morfologisch evenwicht, waarbinnen aquatische en terrestrische beekgebonden ecosystemen zich optimaal kunnen ontwikkelen. In het planproces is dit vaak samengevat in een streefbeeld, een stip aan de horizon die richting geeft aan de integrale doelstelling. Het evenwicht dat zich instelt is afhankelijk van het klimaat en de landschappelijke context van het stroomgebied. Het evenwicht is dynamisch, omdat het beekecosysteem kan meebewegen met veranderingen in klimaat en inrichting van het stroomgebied. Het beekecosysteem kan zichzelf daardoor duurzaam in stand houden. Maatregelen die op de korte termijn genomen worden moeten passen bij de langetermijnontwikkelingen en gericht zijn op het vergroten van het aanpassingsvermogen van het beekstelsel, waardoor het beek(ecos)stelsel ook bestand is tegen extreme situaties. Dit is kenmerkend voor een adaptieve benadering bij de inrichting en het beheer van beken.

#### Beheer

Het instellen van een natuurlijk morfologisch evenwicht na projectuitvoering vraagt om onbelemmerde morfodynamiek. Daarom gelden voor het beheer na projectuitvoering de onderstaande twee principes.

- *Het beheer dient zo minimaal mogelijk te zijn*

Het gericht oplossen van lokale knelpunten moet in de plaats komen van het trajectgewijs afwikkelen van standaardprocedures. In deze optiek kan het beheerplan gelijk zijn aan een calamiteitenplan met passende maatregelen. Beheer volgens dit principe wordt ook wel reactief genoemd, in tegenstelling tot het meer gangbare proactieve beheer, en kan onderdeel zijn van een adaptieve waterbeheersstrategie.

- *Het beheer dient recht te doen aan proces-vorm-relaties*

Waar traditioneel beheer zich richt op het handhaven van bestaande vormen en het minimaliseren van dynamiek, is na geomorfologisch beekherstel een beheer nodig dat geomorfologische processen faciliteert, voor zover ze passend zijn bij



---

de nieuwe condities. Voor planning van beheer kan het helpen om bouwstenen van processen en vormen te definiëren en te evalueren hoe proces-vorm-relaties beïnvloed zouden kunnen worden door beheersmaatregelen.

Een voorbeeld van beheer volgens het eerste principe is dat onvoorziene sedimentopeenhopingen die ontstaan als gevolg van een herstelproject alleen daar worden verwijderd waar ze overlast veroorzaken. Dergelijke beheersingrepen zouden kunnen worden vervangen door een schaderegeling voor gedupeerden, of het opnemen van overlastbeperkende voorzieningen in het ontwerp.

Een voorbeeld van beheer volgens het tweede principe is het gericht suppleren van zand om oevererosie op gang te brengen. Voor het toepassen van deze beheersmaatregel is nog wel onderzoek nodig naar de juiste uitvoering, omvang en frequentie van de maatregel. Het idee erachter is het tijdelijk versnellen van morfodynamiek om sneller een natuurlijke, door de beek zelf gevormde, geomorfologie tot stand te laten komen. De beheersmaatregel is dus tijdelijk van aard en wordt toegepast tot een nieuw morfologisch evenwicht ontstaan is. Goed inzicht in proces-vorm-relaties is een eerste vereiste voor het uitvoeren van dergelijke maatregelen.

---



Met betrekking tot *vegetatiebeheer* worden de onderstaande opmerkingen gemaakt.

- Ga geen vegetatie aanplanten of inzaaien na projectuitvoering. Laat de beek zich zo snel mogelijk via morfologische processen naar een evenwicht bewegen.
- Laat omgevallen bomen liggen. Zij vormen natuurlijke onderdelen van het geomorfologisch processencomplex.
- Vegetatieontwikkeling kan gebruikt worden om geomorfologische ontwikkeling te sturen. Het lokaal verwijderen van bedding- en oevervegetatie kan geomorfologische processen, zoals oevererosie in de buitenbocht, op gang brengen. Anderzijds kan oevervegetatie ook sediment invangen en kan dit een reden zijn om op bepaalde plaatsen (bijvoorbeeld in binnenbochten) vegetatie juist intact te laten. Vegetatiebeheersmaatregelen om morfologische processen te sturen moeten gericht zijn op het bereiken van een nieuw natuurlijk evenwicht na projectuitvoering en zijn daarom per definitie tijdelijk van aard.
- In sommige beken komt vlak na aanleg een vegetatie-explosie op gang van algen en wieren (door eutrofiëring). Het kan nodig zijn deze te verwijderen (en af te voeren) om te voorkomen dat de morfodynamiek stilvalt. De aquatische vegetatieontwikkeling wordt ook beïnvloed door licht: naarmate bos zich ontwikkelt raakt de beek beschaduwd en neemt de vegetatieontwikkeling af.
- Rekening moet worden gehouden met het type beek en het streefbeeld. Wanneer een dynamische beek in een zandlandschap dichtgroeit door eutrofiëring kan het nodig zijn om de vegetatie rigoureus te verwijderen. De morfologie moet daarbij intact blijven. Wanneer een laagdynamische veenbeek dichtgroeit met zegge of riet hoeft dat geen probleem te zijn.
- Vegetatieverwijdering kan ook pleksgewijs/cyclisch gebeuren om soorten een overlevingskans te bieden.

### Monitoring

Hoewel geomorfologisch beekherstel gericht is op een integrale aanpak van het beekstelsysteem op stroomgebiedsniveau, worden maatregelen in het algemeen lokaal, stapsgewijs en gefaseerd doorgevoerd. Daarnaast zijn beekherstelprojecten vaak complexe integrale waterprojecten in het landelijke gebied, waarbij de beoogde effecten van de maatregelen met onzekerheden zijn omgeven en in wisselwerking staan met de omgeving. Geomorfologisch beekherstel vraagt om een adaptieve beheers- en inrichtingsstrategie, waarbij de ingrepen in het beekstelsysteem gezien worden als continu leerproces of experiment (Nijssen *et al.*, 2002). Goed onderbouwde resultaten van vorige ingrepen stellen de beheerders in staat

---

om in vervolgfases van het project flexibel om te gaan met eerder in het planproces vastgestelde maatregelenpakketten. Ervaringen uit de praktijk leren dat werken met meerdere strategieën of adaptatiepaden waartussen gewisseld kan worden, anticiperend op de ontwikkelingen in het systeem, de realisatie van het streefbeeld dichterbij haalt. Hiervoor is echter een combinatie van een adequate maatregel-effect-monitoring en een goede analyse van de monitoringsdata noodzakelijk. Idealiter is geomorfologische monitoring onderdeel van een samenhangend monitoringsprogramma dat ook periodieke hydrologische, chemische en ecologische metingen omvat. Een bekende monitoringssystematiek is 'before-after-control-impact (BACI) design'. Dit betekent dat bij ieder praktijkproject wordt gestreefd naar het verzamelen van gegevens:

- vooraf aan de ingreep, zodat de nulsituatie is gekwantificeerd;
- na de ingreep, zodat de effecten kunnen worden geëvalueerd;
- in het traject waarin de maatregel wordt/is uitgevoerd;
- in een controletraject om de temporele veranderingen die maatregelonafhankelijk zijn uit te schakelen. Het controletraject is vaak gelegen in een vergelijkbare beek nabij de te herstellen beek, of is in dezelfde beek bovenstrooms van het te herstellen beektraject gelegen.

De BACI-systematiek is vooral gericht op ecologische monitoring. Voor monitoring van morfologie is het belangrijker om stroomopwaartse en stroomafwaartse effecten in beeld te brengen, dan de veranderingen in een controletraject in een andere beek. Verder lijkt het goed om bij morfologische monitoring de nulsituatie ook onmiddellijk na projectuitvoering vast te stellen, in aanvulling op een meting voor projectuitvoering.

In [Tabel 3.1](#) is een voorbeeld van een morfologisch monitoringsplan gegeven dat is gebaseerd op de (aangepaste) BACI-systematiek. Het plan is zo opgezet dat het meetgegevens levert die nodig zijn om het stappenplan voor ontwerp uit [paragraaf 3.1](#) eventueel (deels) opnieuw te doorlopen in het kader van een cyclisch ontwerpproces, waarin een verbeterd ontwerp wordt gemaakt voor vervolgfases van het project. Het verzamelen van monitoringsgegevens is in [Tabel 3.1](#) verdeeld over de volgende drie fasen.

- 1 Gegevensvergaring ten behoeve van (morfologische) watersysteemanalyse (*pre-nulfase*). In deze fase worden de gegevens verzameld om een ontwerp te kun-

nen maken en ontwikkelingen te kunnen voorspellen. Tegelijkertijd beschrijven deze gegevens de referentiesituatie. De onderstaande gegevens dienen minimaal verzameld te worden.

- Een opname van de geomorfologische context (in de vorm van dwarsdoorsnedes door het beekdal / de overstromingsvlakte nabij het begin, het midden en het einde van het projectbereik).
  - Een beschrijving van de lithologisch/bodemkundige opbouw van de ondergrond in het dal of de vlakte.
  - Het dalverhang (op basis van dwarsdoorsnedes door het dal).
  - Gedetailleerde dwarsprofielen van de bedding (nabij het begin, het midden en het einde van het projectbereik, of meer indien nodig, bijvoorbeeld bij meerdere stuwpannen e.d.).
  - De  $D_{50}$  van het beddingmateriaal.
  - De afvoerverdeling over het jaar (evt. op basis van een meetstation elders en waterstanden gemeten in het projectbereik).
  - De stijghoogte van het grondwater in buizen loodrecht op de beek in het gehele dal (het hele jaar om de 14 dagen gemeten in het profiel door het beekdal midden in het projectbereik).
- 2 De *nulfasemeting* die de situatie direct na uitvoering beschrijft. In deze fase worden de metingen van waterstanden en grondwaterstandsdynamiek voortgezet. De volgende gegevens dienen aanvullend verzameld te worden.
- Nieuwe dwarsprofielen van de bedding, inclusief de oeverwalzone (in het buigpunt van bochten en halverwege daartussen).
  - Een kaartbeeld van het geulpatroon (evt. een luchtfoto met een drone).
  - Dwarsprofielen door het beekdal/de overstromingsvlakte (nabij het begin, het midden en het einde van het projectbereik).
  - Een beschrijving van de lithologische en bodemkundige opbouw van de oevers in de dwarsprofielen door het beekdal/de overstromingsvlakte.
  - De  $D_{50}$  van het beddingmateriaal.
  - Een kartering van substraatmozaïeken tijdens lage afvoer.
  - Een kartering van vegetatiestructuren in de overstromingsvlakte en in de beek.

De bepalingen van de  $D_{50}$  en de karteringen van de substraatmozaïeken en vegetatiestructuren dienen plaats te vinden in de dwarsprofielen van de bedding en de overstromingsvlakte.

3 *Periodieke gegevensvergaring.* In deze fase wordt de morfologische ontwikkeling in de tijd beschreven. In deze fase worden ook hydrologische gegevens verzameld die indicatief zijn voor morfologische ontwikkelingen. De gegevens die in de nulfasemeting verzameld zijn, worden in deze fase periodiek opnieuw verzameld. De frequentie waarmee dit gebeurt neemt af in de tijd, omdat de snelheid van veranderingen doorgaans afneemt met verloop van tijd. Gegevens kunnen bijvoorbeeld verzameld worden na 1, 3, 6 en 10 jaar (Tabel 3.1). Aanvullend kunnen gegevens over sedimentatie in de dalvlakte verzameld worden door periodieke metingen tijdens hoogwater met sedimentvallen (bijvoorbeeld slibmatten). Deze metingen kunnen gedaan worden in de lange dwarsprofielen door het beekdal / de overstromingsvlakte.

**Tabel 3.1** MONITORINGSPLAN

Voorbeeld van een monitoringsplan voor de periode tot 10 jaar na projectuitvoering.

	PRE-NULFASE	PROJECT-UITVOERING	NULFASE	NA 1 JAAR	NA 3 JAAR	NA 6 JAAR	NA 10 JAAR
Lange dwarsdoorsnedes door overstromingsvlakte/dal	x						
Lithologische/bodemkundige opbouw in overstromingsvlakte/dal en oevers	x		x				
Dalverhang	x		x				
Korte dwarsprofielen door bedding	x		x	x	x	x	x
D <sub>50</sub> beddingmateriaal	x		x	x	x	x	x
Jaarlijkse afvoerdeling/waterstanden	x		x	x	x	x	x
Stijghoogte grondwater	x		x	x	x	x	x
Geulpatroon			x	x	x	x	x
Substraatmozaïeken			x	x	x	x	x
Vegetatiestructuren			x	x	x	x	x

De frequentie van morfologische monitoring zou minimaal jaarlijks moeten zijn met bijvoorbeeld een meting in de zomer bij laagwater (met eventueel een extra meting direct na een hoogwater in de winter). Het detailniveau zou idealiter een volledige 3D-opname met een geautomatiseerd systeem (bijvoorbeeld met een drone) moeten zijn. Wanneer handmatig gemeten moet worden kan in transecten dwars op de beek gemeten worden, waarbij transecten de apex van iedere bocht kruisen en ook transecten halverwege tussen twee bochten gemeten worden. Aanvullend verdient het aanbeveling om regelmatig op vaste plaatsen grijpmonsters van beddingmateriaal te nemen en een visuele inspectie van oevers en bedding uit voeren, waarbij indicatoren van geomorfologische processen fotografisch vastgelegd worden.

Morfodynamiek in de overstromingsvlakte kan met zogenoemde slibmatten (Fig. 3.4) gemeten worden. Dit zijn kunstgrasmatten die met spijkers vastgeprikt worden om sediment op te vangen dat met overstroming wordt afgezet. Langs de grote rivieren is hiermee veel ervaring opgedaan (Maas *et al.*, 2003). De matten worden in raaien uitgelegd voor overstroming en worden met sediment na overstroming verzameld, waarna de matten worden uitgespoeld en het vrijgekomen sediment wordt opgevangen en gemeten.

**Fig 3.4 EEN SLIBMAT IN HET VELD**

*De lichtgrijze kleur duidt op afzetting van fijn sediment (afmeting slibmat 50x50 cm).*



---

Morfologische monitoring moet voldoende lang zijn en duren tot een morfologisch evenwicht bereikt is. Voorbeelden van handmatige monitoring worden gegeven door Wolfert (2001). Eekhout & Hoitink (2014) beschrijven geautomatiseerde monitoring. Omdat geomorfologische monitoring arbeidsintensief kan zijn is het te overwegen om aan te sluiten bij universitaire onderzoeks- of onderwijsprogramma's. Idealiter is geomorfologische monitoring onderdeel van een breder integraal monitoringsprogramma, bijvoorbeeld zoals voorgesteld in Reeze & Lenssen (2015).

## **3.4 PRAKTIJKVOORBEELDEN VAN GEOMORFOLOGISCH BEEKHERSTEL**

### **3.4.1 Inleiding**

Om te illustreren hoe de in dit handboek voorgestelde stapsgewijze ontwerpaanpak in de praktijk werkt, worden in deze paragraaf twee cases van beekherstel behandeld waarin de beschreven aanpak min of meer is gevolgd. Dit is in beide cases overigens geen bewust proces geweest, de aanpak was immers nog niet uitgewerkt. Er is gekozen voor twee zeer verschillende cases, qua schaal en benadering van herstel, om zo diverse aspecten van geomorfologisch beekherstel in de praktijk te kunnen belichten.

In de case Hagmolenbeek ([subparagraaf 3.4.2](#)) gaat het om het herstel van een klein beekstelsysteem met beperkte morfodynamiek, waarbij het geulontwerp vooral op hydrologische gronden is gebaseerd. Een deel van het herstel is reeds uitgevoerd en wordt systematisch gemonitord.

In de case Overijsselse Vecht ([subparagraaf 3.4.3](#)) gaat het om herstel van een relatief groot (grensoverschrijdend) en dynamisch systeem waarin op geomorfologisch-landschappelijke gronden verschillende trajecten te onderscheiden zijn. Voor ieder traject is op basis van geomorfologische relaties een apart geulontwerp gemaakt. Het herstel zal over een lange periode gefaseerd worden gerealiseerd en is momenteel in uitvoering.

### **3.4.2 Case Hagmolenbeek**

#### *Inleiding*

De Hagmolenbeek is een beek in het zuidelijk deel van Twente, die valt in het beheersgebied van waterschap Vechtstromen (voorheen Regge en Dinkel). De totale omvang van het stroomgebied van de Hagmolenbeek bedraagt ca. 9260 ha. De Hagmolenbeek is een grensoverschrijdende beek, ongeveer 680 ha van het stroom-

gebied ligt op Duits grondgebied. Oorspronkelijk maakte de beek deel uit van het stroomgebied van de Regge, maar bij de aanleg van het Twentekanaal in 1936 is de Hagmolenbeek van de Regge afgekoppeld en sindsdien watert de beek bij Delden af in het kanaalpand Eefde - Delden.

De Hagmolenbeek, oorspronkelijk een bochtige beek, is tijdens de dertiger jaren van de vorige eeuw rechtgetrokken, gestuwd en verdiept. Het beekdal is daarbij plaatselijk opgehoogd. De ‘genormaliseerde’ Hagmolenbeek had een lage ecologische kwaliteit. In het smalle beekdal was geen ruimte voor waterberging, waardoor hoge piekafvoeren optraden. Het peilbeheer was afgestemd op de laagste delen in het dal, waardoor er sprake was van verdroging van de aangrenzende natte heidevelden en hoger gelegen landbouwpercelen.

Er waren dus meerdere aanleidingen om de Hagmolenbeek en haar oevers opnieuw in te richten. De Hagmolenbeek is één van de beken in het beheersgebied van waterschap Vechtstromen waarop de doelstellingen van ‘Waterbeleid voor de 21<sup>e</sup> eeuw’ (WB21) en van de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) van toepassing zijn. De belangrijkste doelen die uit de KRW voortvloeiden waren het natuurvriendelijk inrichten van de beek en het (vis)passeerbaar maken ervan. Daarnaast was het beekdal gedeeltelijk door de provincie begrensd als nieuwe natuur die deel uitmaakt van de Provinciale Ecologische Hoofdstructuur (PEHS). Tevens was een aansluitend deel van het dal van de Hagmolenbeek opgenomen in het pilotproject ‘Boeren voor natuur Twickel’. In het Waterbeheerplan 2010-2015 (Waterschap Regge en Dinkel, 2009b) zijn voor de Hagmolenbeek de volgende maatregelen vastgelegd:

- realisatie van 20 vispassages;
- het creëren van een bochtige beekloop binnen 5 m ruimte aan weerszijden van de gekanaliseerde beek over een lengte van 19 km;
- het realiseren van natuurlijke oevervorming en het toestaan van spontane houtige oeverbegroeiing over een lengte van 19 km;
- eenzijdig extensief onderhoud langs de steile oever over een lengte van 19 km.

Het plan beschrijft een gefaseerde uitvoering van de maatregelen.

Door de brede bestuurlijke samenwerking en afstemming met direct aanliggende particuliere grondeigenaren en -gebruikers kon voor het plangebied Beckum een ambitieuzere doelstelling geformuleerd worden dan aangegeven in het waterbe-

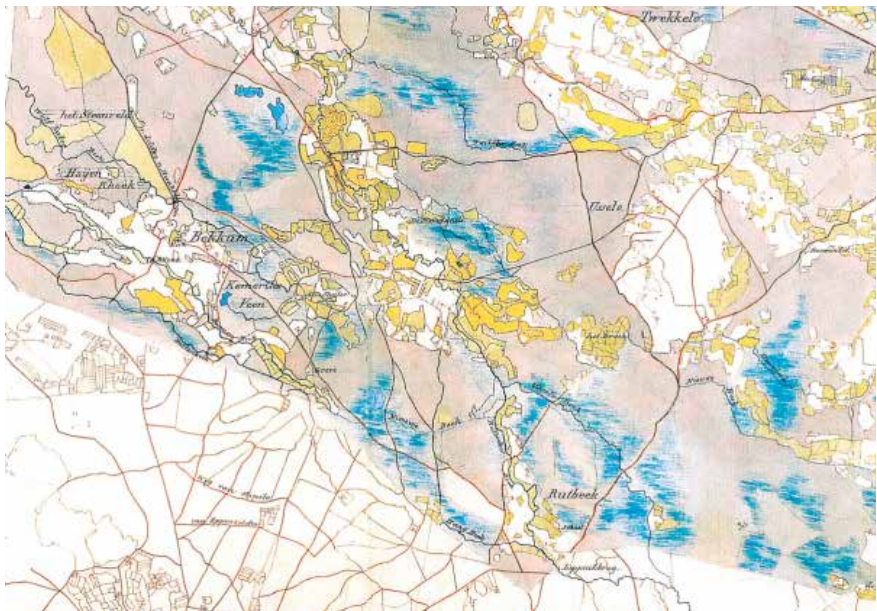


heersplan. Voor het 3,9 kilometer lange beektraject in dit plangebied werd ingestoken op een beekdalbrede invulling van beekherstel om de synergie tussen water en natuur te herstellen. De doelstelling voor het opnieuw in te richten beekdal werd vertaald in de volgende ambities:

- een zo natuurlijk mogelijk beekdal waarin beekprocessen de ruimte krijgen zonder dat dit leidt tot opbrengstderving op gronden met een blijvende agrarische functie;
- inundatie van het beekdal, beginnend vanaf  $\frac{1}{2}Q$ , een afvoer die tussen de 10 en 20 dagen per jaar optreedt;
- een smalle en ondiepe bedding die zolang mogelijk watervoerend blijft en waarin variatie in stroming plaatsvindt;
- ruimte voor beekmorfologische processen, zoals meandervorming;
- een volledig vispasseerbare waterloop;
- alleen extensief onderhoud.

**Fig 3.5 DE HUGUENIN-KAART UIT 1828**

De Huguenin-kaart uit 1828 met daarop een deel van het stroomgebied van de Hagmolenbeek.



**Fig 3.6 GEOMORFOLOGISCHE KAART**

*Uitsnede van de Geomorfolologische kaart van Nederland 1 : 50.000 van plangebied Beckum van de Hagmolenbeek.*



De ambities zijn vervolgens vertaald naar een streefbeeld voor de Hagmolenbeek. Dit streefbeeld is een natuurlijke bochtige en vrij afstromende waterloop binnen de begrenzing van het beekdal dat met enige regelmaat (10-20 dagen per jaar) zal overstromen. De lage overstromingsgronden zullen begroeid raken met plantensoorten die kenmerkend zijn voor natte hooilanden.

Hieronder zal besproken worden in hoeverre het stappenplan voor het ontwerp-proces van geomorfologisch beekherstel is gevolgd in de case Hagmolenbeek. De case Hagmolenbeek bestaat uit twee aansluitende projecten: Beckum en 'Boeren voor natuur Twickel'.

De ontwerpstappen worden geïllustreerd met voorbeelden uit beide projecten op basis van een intern document van waterschap Regge en Dinkel (Waterschap Regge en Dinkel, 2012) en een powerpoint-presentatie ('Herinrichting Hagmolenbeek

---

Loninkwoner Beckum, excursie WEW, CoP, STOWA; 9 mei 2012' van B. Worm, P.J. Damsté en F. Koop). Per project zijn niet alle stappen uitgevoerd.

### *Stap 1 Ruimtelijke analyse*

In het kader van het Stroomgebiedactieplan 2009-2019 (Waterschap Regge en Dinkel, 2009a) heeft het waterschap Regge en Dinkel een uitgebreide watersysteemanalyse uitgevoerd van het stroomgebied van de Hagmolenbeek. Daarbij is aandacht besteed aan de basiskenmerken van het landschap, zoals de geologie, de geomorfologie en de bodem. Daarnaast is met behulp van historische kaarten en andere bronnen de landschapsgeschiedenis in beeld gebracht door het historisch grondgebruik en de historische ontwikkeling van het watersysteem te beschrijven (Fig. 3.5).

Ten behoeve van het projectplan Beckum is een nadere analyse gemaakt van de landschappelijke en historische context van het te herstellen beektraject (Figuren 3.6 en 3.7). De resultaten van deze analyse hebben geen expliciete rol gespeeld in het vervolg van het ontwerpproces (bijvoorbeeld door het onderscheiden van verschillende beektrajecten op landschappelijke gronden).

---

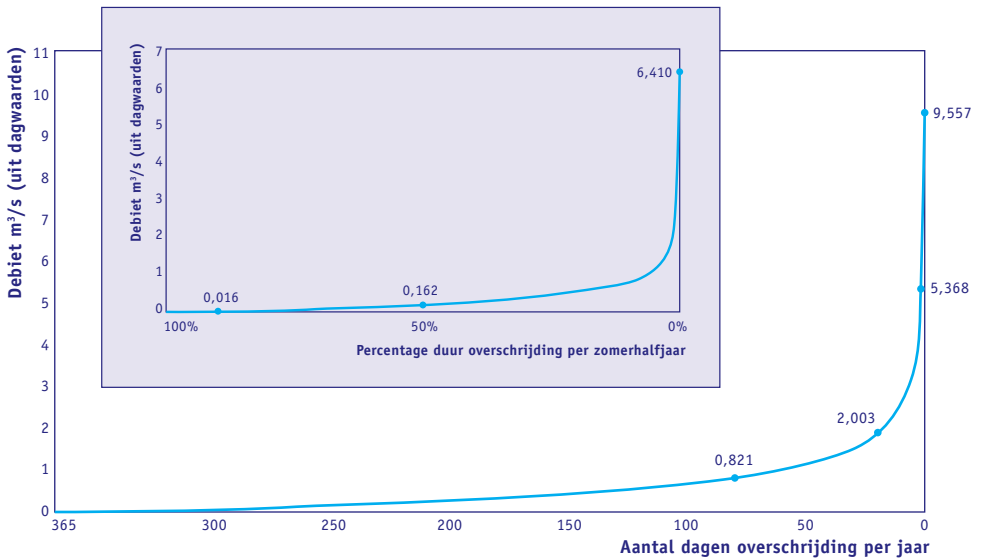
**Fig 3.7 BODEMKAART**

*Uitsnede van de Bodemkaart van Nederland 1 : 50.000 van plangebied Beckum van de Hagmolenbeek.*



**Fig 3.8 AFVOERKARAKTERISTIEKEN**

Afvoercharacteristieken, in de vorm van een afvoerduurlijn, over de periode 1979–2007 ter plaatse van de uitmonding van de Hagmolenbeek in het Twentekanaal. Het debiet varieert van 0 m<sup>3</sup>/s (meerdere dagen per jaar) tot ca. 5,4 m<sup>3</sup>/s (1 dag per jaar). Maximaal is een afvoer van 9,6 m<sup>3</sup>/s gemeten.



#### Stappen 2 en 3 Patroonvoorspelling en evaluatie van het voorspelde geulpatroon

In de planvorming voor de herinrichting van de Hagmolenbeek zijn deze stappen niet uitgevoerd.

#### Stap 4 Ontwerp van morfometrie

De morfometrie van de nieuw in te richten beek is geheel gebaseerd op de actuele afvoercharacteristieken van de Hagmolenbeek (Fig 3.8) en de grondwaterdynamiek. Het belangrijkste uitgangspunt voor de dimensionering van de beek is de in het streefbeeld geformuleerde gewenste inundatieduur van het beekdal. De nieuwe beek heeft een klein dwarsprofiel (Fig. 3.9) voor de afvoer tot ½Q; dit is een afvoer die 10-20 dagen per jaar wordt bereikt of wordt overschreden. Vanaf ½Q treden inundaties op in het beekdal. Het nieuwe profiel

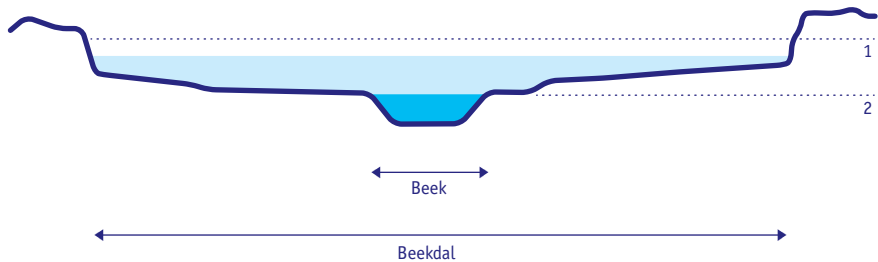
heeft een bodembreedte van 1,5 m bovenstrooms tot 1,75 m benedenstrooms. Ten opzichte van de genormaliseerde beek betekent dit een halvering van de beekbodembreedte. De breedte en maaiveldhoogte van het beekdal zijn afgestemd op de maatgevende waterstand bij een eens in de honderd jaar voorkomende afvoer ( $T=100$ ).

**Fig 3.9**

### HET ONTWERPPROFIEL VAN DE HAGMOLENBEEK VOOR PROJECT BECKUM

1: De afmeting van het beekdal wordt opgehangen aan het peil bij  $T=100$ .

2: Vanaf  $\frac{1}{2}Q$ , een afvoer die 10 tot 20 dagen per jaar bereikt wordt of wordt overschreden, treden inundaties op in het beekdal.



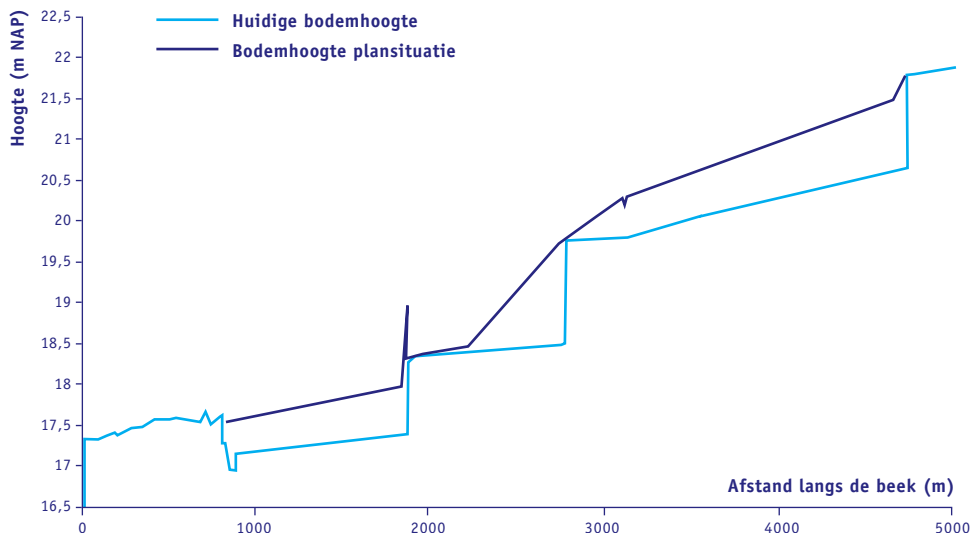
Naast een verkleining van het basisprofiel, voorziet het ontwerp voor ook in een verhoging van de beekbodem, waarbij wordt aangesloten op de bodemhoogtes van de beek in het bovenstroomse en benedenstroomse traject (Fig. 3.10). De nieuwe beek krijgt een licht bochtige loop, maar volgt globaal de as van het dal. In verhouding tot het huidige tracé is de nieuwe loop ruim 20% langer.

#### Stap 5 Ruimtelijke inpassing

Het ontwerp van de nieuwe beekloop is ingepast in de geomorfologie van het beekdal. De nieuwe beekloop volgt grotendeels de as van het oorspronkelijke beekdal. Aan weerszijden van de beekloop zijn op natuurlijke plekken beekoverstromingsvlakten ingericht en zijn steilranden en geleidelijke overgangen naar de hogere gronden aan de randen van het dal in stand gehouden of geaccentueerd. Tevens ligt een deel van de ontworpen beekloop in een historisch tracé van de beek uit 1932.

**Fig BODEMHOOGTE VAN DE HAGMOLENBEEK**

**3.10** De bodemhoogte in het ontwerp en de bodemhoogte in de uitgangssituatie in het plangebied Beckum. Tussen 0 en 825 m is de bodemhoogte in het aansluitende deel van project 'Boeren voor natuur Twickel' weergegeven.



*Stap 6 Hydraulische en hydrologische toetsing*

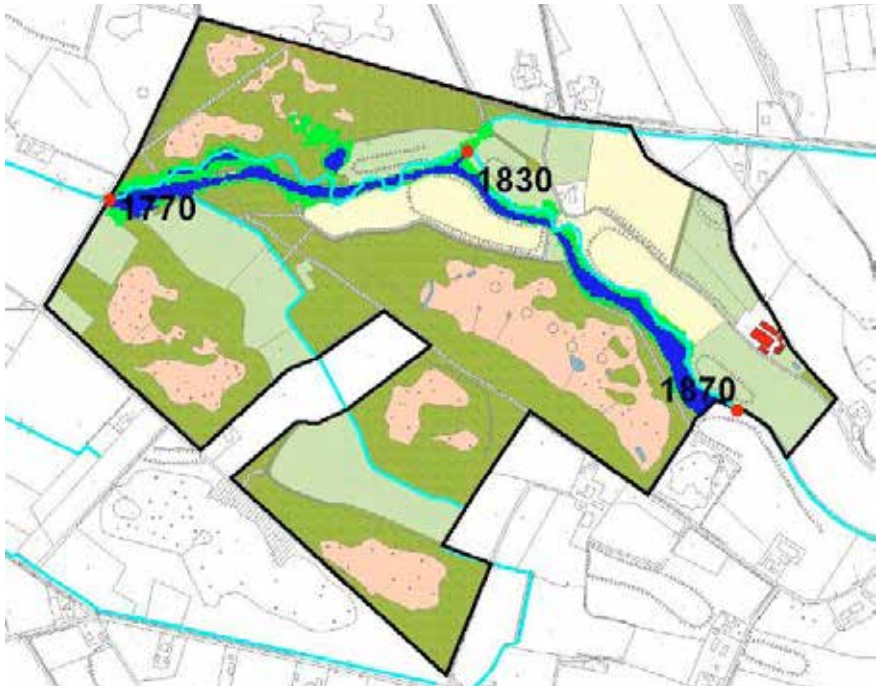
Om de effecten van de herinrichting op de oppervlakte- en grondwaterstanden en op de stroomsnelheden in beeld te brengen, zijn een hydraulisch rekenmodel en een grondwatermodel ingezet. Met het hydraulische model SOBEK zijn voor de afvoersituaties 1/100 Q, ¼Q, 1Q en T=100 de waterstanden en stroomsnelheden berekend. Door de beekbodemverhoging nemen de peilen in de beek gemiddeld over het traject toe. In de bestaande situatie inundeert het dal op een aantal locaties bij extreme afvoersituaties. In de plansituatie zijn de inundaties evenwichtiger verdeeld over het gehele beekstelsel. Vanaf een afvoer van ½Q treden binnen het beekdal inundaties op. Bij de maatgevende waterstand bij T=100 zijn de bebouwde gebieden van inundatie gevrijwaard (Fig. 3.11).

Het verkleinen van het beekprofiel heeft een gunstig effect op de stroomsnelheid: er zullen hogere stroomsnelheden in de beek voorkomen. Het uitgangspunt voor

het ontwerp was een gemiddelde stroomsnelheid bij  $\frac{1}{4}Q$  van 20 tot 40 cm/s. Met het oppervlaktewatermodel zijn de stroomsnelheden bij  $\frac{1}{4}Q$  doorgerekend. Hieruit blijkt dat het ontwerp voldoet aan het gestelde uitgangspunt. Door het aanleggen van bochten en het toestaan van spontane beekprocessen zal er bovendien meer variatie in de stroomsnelheden ontstaan. Dit is gunstig voor de ecologische kwaliteit van het beekstelsel.

**Fig 3.11 INUNDATIE BIJ HOGERE AFVOEREN**

**3.11** *Inundatie van het dal bij 1Q afvoer (blauw) en een afvoer bij T=100 (groen) in het plangebied 'Boeren voor natuur Twickel'.*

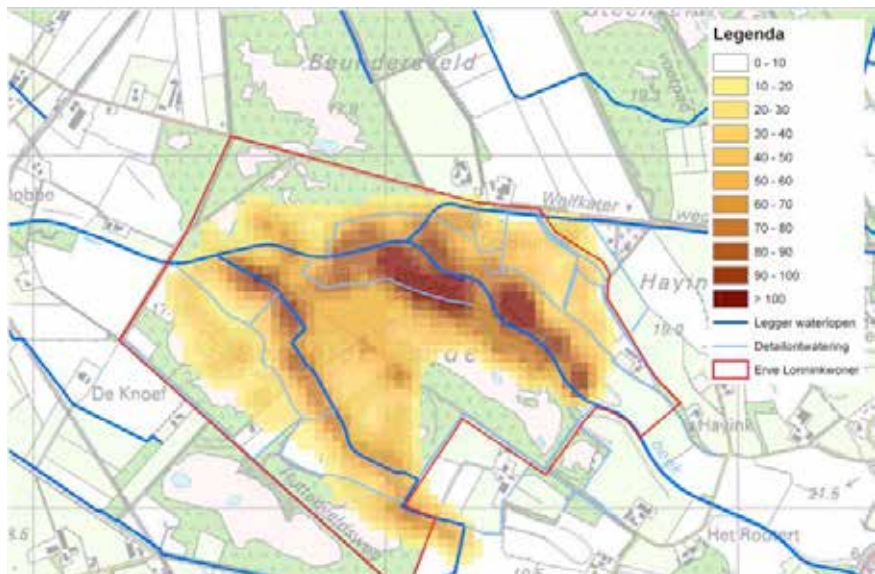


De modeluitkomsten van SOBEK vormden invoer voor het grondwatermodel Twente (van Deltares), waarmee de effecten op de grondwaterstanden zijn bepaald. De invoer voor het grondwatermodel bestond uit berekende peilen in de zo-

mer ( $1/100Q$ ) en in het voorjaar ( $1/4Q$ ) en de bodemhoogtes van de waterlopen. Het grondwatermodel berekent de effecten op de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) (Fig. 3.12). Ook worden de grondwaterstanden ten opzichte van het maaiveld in de nieuwe situatie weergegeven.

**Fig 3.12 EFFECTEN OP DE GRONDWATERSTAND**

**3.12** *Effecten van de herinrichting van de Hagmolenbeek op de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) in het plangebied 'Boeren voor natuur Twickel'. Legendawaarden geven het verschil ten opzichte van de uitgangssituatie in cm.*



Uit het model blijkt dat door de verhoging van de beekbodem en de verkleining van het beekprofiel, de drainerende werking van de beek op de grondwaterstanden minder wordt. Direct langs de beek is de verhoging van de GHG gemiddeld ca. 25-50 cm. Door het smalle beekdal en het feit dat naastgelegen gronden veelal hoger gelegen zijn, hebben de effecten een relatief beperkte reikwijdte in de hogere gronden langs het smalle beekdal.



---

De resultaten van de berekeningen met het grondwatermodel vormden vervolgens weer de input voor de berekeningen van de doelrealisatie van de grondgebruiksfuncties langs de beek met het Waterlood-instrumentarium (Alterra). De doelrealisatie is de mate waarin een functie bediend wordt, uitgedrukt in percentages op een schaal van 0 tot 100% (100% = maximale bediening voor de functie). Dit model berekent opbrengsten op basis van de zogenaamde HELP-methode. Deze methode geeft de opbrengstdepressie in termen van droogte- en natschade, afhankelijk van grondsoort, gewas en grondwatertrap (variatie van grondwaterstanden in de tijd). Voor de keuze van het gewas is gebruik gemaakt van het LGN4-grondgebruiksbestand aangevuld met huidige inzichten op basis van de luchtfoto's (2009) en actuele terreinkennis.

Uit de Waterlood-analyse blijkt dat de effecten op de landbouw gering zijn en dat de effecten binnen de grenzen van het nieuwe beekdal vallen. Effecten zijn hier toegestaan omdat hier een functieverandering wordt doorgevoerd (van landbouw naar natuur). Samengevat wordt geconcludeerd dat de herinrichting van de Hagmolenbeek met de maatregelen in de perceelontwatering geen negatief effect heeft op de landbouw in het gebied. De verhoging van de grondwaterstanden heeft positieve effecten voor de in het plangebied aanwezige (grond)waterafhankelijke natuur langs de Hagmolenbeek. Met name de bossen en natte heideterreinen zullen hiervan profiteren.

#### *Stap 7 Het plannen van monitoring en beheer*

In het kader van het project Beekdalbreed hermeanderen is voor de Hagmolenbeek in het plangebied 'Boeren voor natuur Twickel' een gestandaardiseerd monitoringsprogramma opgezet. In dit monitoringsprogramma worden hydrologische, morfologische en biologische metingen uitgevoerd. De meetopzet is ontworpen als een before-after-control-impact (BACI) design (paragraaf 3.3). Een overzicht van het monitoringsprogramma is weergegeven in Tabel 3.2.

Het beheersplan voorziet in een extensivering van het beheer en onderhoud. In de eerste jaren zal er sprake zijn van een overgangsbeheer. Uit ervaring is gebleken dat met name in de beginfase sprake is van een sterke oever- en waterbegroeiing door de hoge beschikbaarheid van voedingsstoffen. Het beheer in de eerste jaren zal bestaan uit het twee keer per jaar schonen van het basisprofiel en het twee keer per jaar maaien van het beekdal. Op den duur kan naar verwachting volstaan worden met een extensiever beheer.

## Tabel 3.2 HET MAATREGELEFFECTMEETSHEMA VOOR HET PROJECT HAGMOLENBEEK

3.2

<sup>1</sup> GNSS = *Global Navigation Satellite System* (bijv. GPS). (Verdonschot et al., 2012).

PARAMETER	Aantal monsters maatregel- traject	Aantal monsters controle- traject	Meetfrequentie	Methode
<b>BEEK</b>				
Afvoer	2 (boven en beneden)	1	continu	meetstuw en waterhoogte- logger
Stroomsnelheid	4	4	maandelijks	v-meter
Dwars- en lengteprofiel	4	4	na extremen	GNSS <sup>1</sup>
Substraatpatroon	1 (5)	1 (5)	maandelijks	raster
Korrelgrootte	2 (oever en bodem)	2 (oever en bodem)	maandelijks	steekbuis
Bodemopbouw	raai	raai	eenmalig	boring
Veld pH, eGv, O <sub>2</sub>	1	1	maandelijks	veldmeters
Waterchemie	1	1	tweemaandelijks	NEN-norm
Macrofauna	4	4	4x voor, 4x na	surbersampler

### BEEKDAL

Inundatie = afvoer	2 (boven en beneden)	1	continu	meetstuw en waterhoogte- logger
Grondwaterstand	1 raai (4)	1 raai (4)	continu	logger
Poriënwaterchemie	3 raaien (4)	3 raaien (4)	1x/kwartaal	
Vegetatie	3	3	8x	'transect'
Zaaddepositie	3	3	continu	val

Op een aantal trajecten zal worden afgeweken van het hierboven beschreven beheer en onderhoud. Waar de beek grenst aan het bos zal de beek niet worden onderhouden. De begroeiing langs de beek mag hier overgaan in het natte bosgebied langs

---

de beek. Beek en bosgebied zullen één geheel gaan vormen. In een ander deel van het beekdal wordt een opgaande begroeiing van bomen nagestreefd. De schaduwwerking van de bomen zal naar verwachting een positief effect hebben op het beekmilieu. Daarnaast zorgen de boomwortels voor het vasthouden van de beekoever, waarbij tussen de boomwortels een geschikt leefmilieu voor macrofauna ontstaat.

#### *Evaluatie*

Wanneer het ontwerpproces voor de Hagmolenbeek vergeleken wordt met het in [paragraaf 3.1](#) beschreven stappenplan valt op dat de stappen 2 en 3 voor de Hagmolenbeek niet zijn uitgevoerd. Dit betekent dat geen voorspelling gedaan is van welk patroon met bijbehorende morfodynamiek zich kan gaan ontwikkelen. Wellicht mede hierdoor kreeg men na uitvoering van het project op een aantal plaatsen te maken met onverwachte oevererosie die door aanleg van oeverbeschoeiing tot staan is gebracht. Een inhoudelijk verschil met de aanpak beschreven in [paragraaf 3.1](#) is dat in het project Hagmolenbeek in stap 4 het ontwerp van morfometrie gericht was op het behalen van een bepaalde jaarlijkse inundatieduur van het beekdal (10-20 dagen per jaar) en bepaalde stroomsnelheden in de bedding (20-40 cm/s). Dit betekent dat geprobeerd is de (aangelegde) morfometrie sturend te laten zijn voor de hydrologische en hydraulische eigenschappen van de beek. In geomorfologisch beekherstel wordt juist andersom gewerkt en wordt op basis van (een inschatting van de natuurlijke) hydrologische en hydraulische karakteristieken een morfometrie voorspeld. Het gevolg van de afwijkende aanpak in het project Hagmolenbeek is dat de bedding vrij sterk is ondergedimensioneerd, wat geleid heeft tot sterke morfologische activiteit van de beek om ruimere dimensies te bereiken die beter passen bij de natuurlijke randvoorwaarden.

### **3.4.3 Case Overijsselse Vecht**

#### *Inleiding*

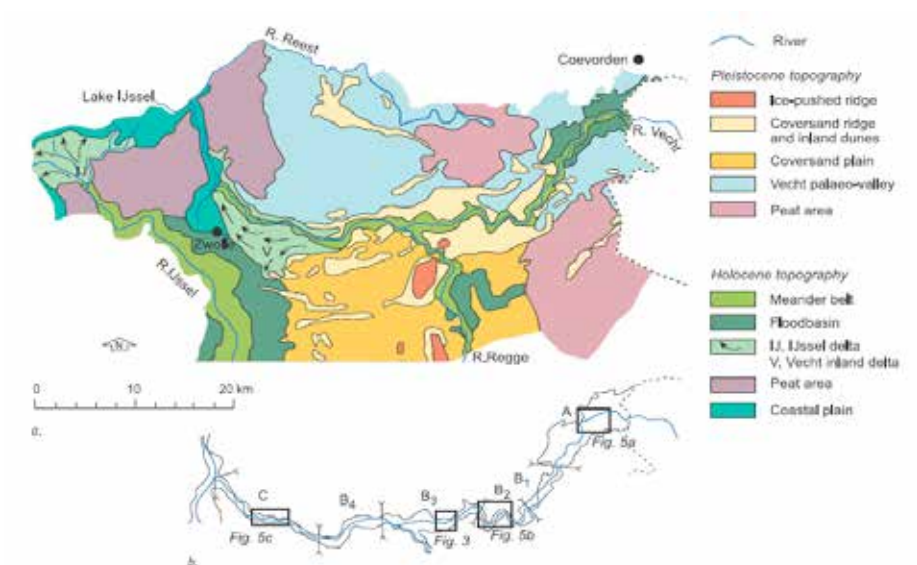
In 2009 is de Grensoverschrijdende Vechtvisie tot stand gekomen, waarin voor het stroomgebied van de Vecht de mogelijkheden zijn verkend om de gekanaliseerde en gestuwde rivier om te vormen tot een half-natuurlijke laaglandrivier. Om in Nederland deze grensoverschrijdende visie verder uit te werken en ook daadwerkelijk te kunnen realiseren is nog in datzelfde jaar voor de Overijsselse Vecht het programma 'Ruimte voor de Vecht' van start gegaan, met als doelen:

- de natuuropgaven voor zowel de water- als landnatuur (KRW en Natura 2000) te realiseren;

- zorg te dragen voor de waterveiligheid in het Vechtdal voor mens en dier;
- een sociaaleconomische impuls te creëren.

**Fig 3.13 GEOMORFOLOGIE EN LANDSCHAP ROND DE VECHT**

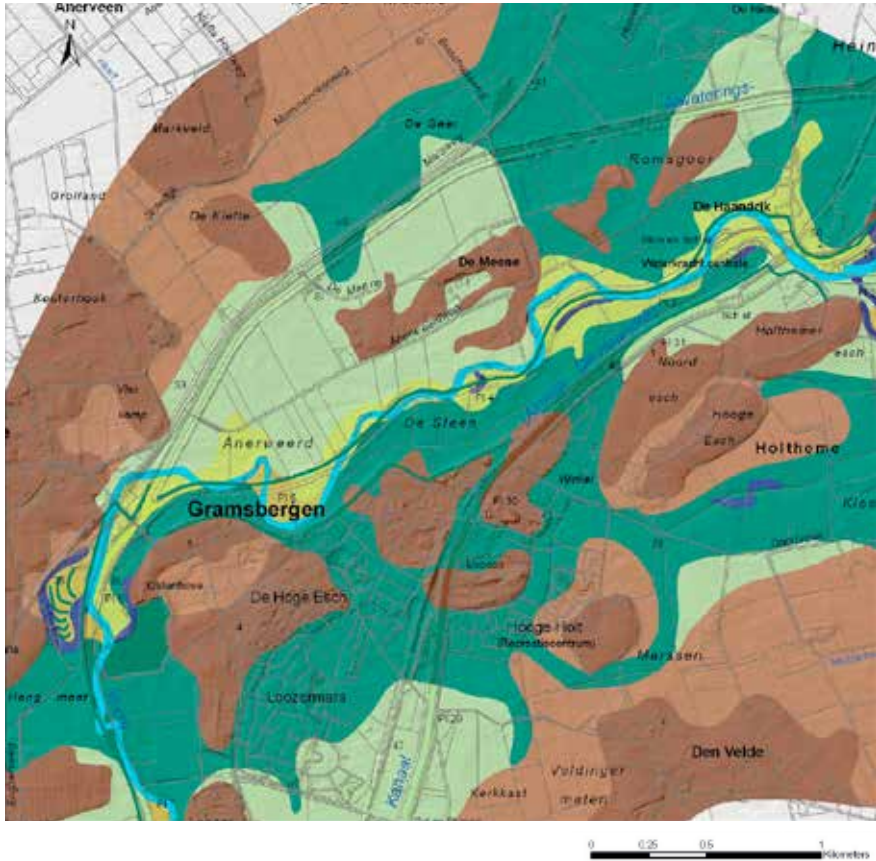
De geomorfologisch-landschappelijke ligging van de Overijsselse Vecht en indeling van de rivier in verschillende trajecten (Wolfert & Maas 2007). Traject A is in stap 2 onderverdeeld in A1 (bovenstrooms) en A2 (benedenstrooms); de trajecten B1, B2 en B3 in deze figuur vormen samen traject B1 genoemd in stap 2; traject B4 in deze figuur is traject B2 in stap 2.



De ambitie om de Vecht om te vormen tot een half-natuurlijke rivier integreert de opgaven die vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) en Natura 2000 voor het Vechtstelsysteem gelden. De KRW is gericht op het behoud en de ontwikkeling van een goede ecologische en chemische toestand van het oppervlaktewater. Voor de Vecht gelden de volgende opgaven:

- het 'herstel' van de biologische passeerbaarheid en vergroting van de diversiteit aan habitats voor aquatische en amfibische soorten;
- het gebruik van de rivier en het water in overeenstemming brengen met de milieudoelstellingen;

**Fig 3.14** HET RIVIERLANDSCHAP IN TRAJECT A VAN DE OVERIJSSSE VECHT  
(Wolfert & Maas, 2007).



- de reductie van diffuse toevoer van verontreinigingen (nutriënten, gewasbeschermingsmiddelen, metalen, gevaarlijke stoffen uit historische verontreinigingen) en vermindering van de klassieke belastingen uit industriële en gemeentelijke bronnen.

De Natura 2000-opgaven voor het Vechtdal zijn gericht op het behoud en de ontwikkeling van aan het riviersysteem gebonden terrestrische en amfibische natuurwaarden, in het bijzonder de stroomdalgraslanden, de trilvenen in afgesneden meanderbochten en de oibossen.

In het kader van het programma ‘Ruimte voor de Vecht’ zijn de potenties voor rivierherstel van de Overijsselse Vecht nader onderzocht (Wolfert *et al.*, 2009). Deze studie naar de geomorfologische en hydraulische werking van het systeem heeft geleid tot een streefbeeld en een uitvoeringsstrategie om in de komende decenia de Overijsselse Vecht om te vormen tot een half-natuurlijke laaglandrivier. De resultaten uit deze studie zijn verwerkt in het masterplan voor het programma ‘Ruimte voor de Vecht’.

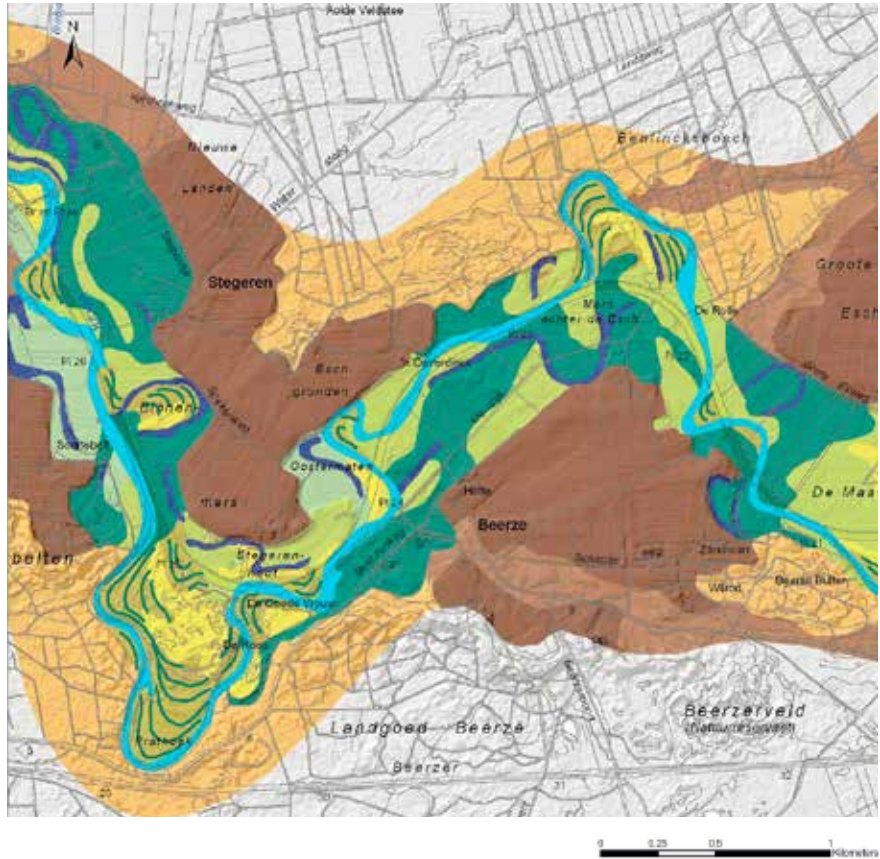
Hieronder zal besproken worden in hoeverre het stappenplan voor het ontwerp-proces van geomorfologisch beekherstel is gevolgd in de case Overijsselse Vecht.

### *Stap 1 Ruimtelijke analyse*

De studie is gestart met een oriëntatie op de landschappelijke en historische context van de rivier de Vecht. Diverse kaartbronnen zijn daarvoor geanalyseerd met als resultaat een globale beschrijving van de toestand van het landschap en een indeling van de rivier in drie verschillende trajecten (Fig. 3.13). De onderstaande beschrijving en indeling betreft de oorspronkelijke rivier voor kanalisatie en plaatsing van stuwen.

Traject A van de Vecht, vanaf de Duitse grens tot Hardenberg, kenmerkt zich door een smalle meandergordel met oeverwallen in een brede overstromingsvlakte (Fig. 3.14). Kronkelwaarden en natuurlijk afgesneden meanderbochten komen weinig voor en in de overstromingsvlakte is een laag klei van ongeveer 1 m dik afgezet. Vanaf Gramsbergen neemt de rivierafvoer toe door confluente van de Vecht met het afwateringskanaal Coevorden. In traject B, van Hardenberg tot Dalfsen ligt de rivier in een dal ingesloten tussen hogere dekzandruggen (Fig. 3.15). De meandergordel is hier breder en kronkelwaarden en natuurlijk

**Fig 3.15** HET RIVIERLANDSCHAP IN TRAJECT B VAN DE OVERIJSSELSE VECHT  
(Wolfert & Maas, 2007).



**Holocene fluvial landscape**

- River channel
- Abandoned channel
- Scroll bars and swales
- Natural levee
- Aeolian dunes
- Floodplain flat
- Floodbasin

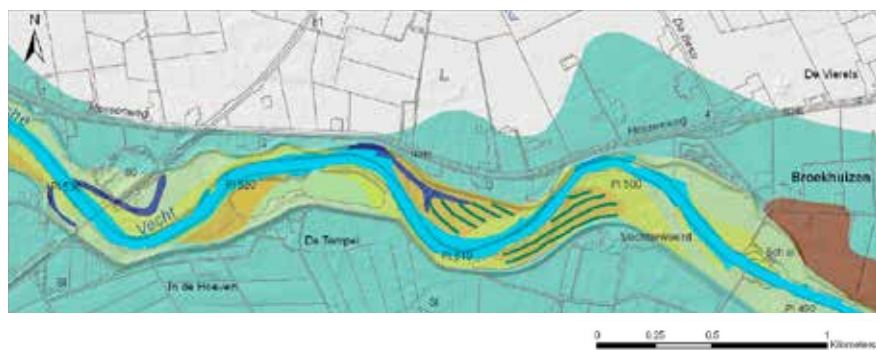
**Weichselian periglacial and Holocene aeolian landscape**

- Coversand undulations / River terrace
- Open field with plaggen soil
- Aeolian dunes
- Vecht inland delta



afgesneden meanderbochten komen veelvuldig voor. Enkele meanderbochten zijn sterk uitgebouwd en dringen diep binnen in het aan het dal grenzende dekzandlandschap. Karakteristiek voor dit traject zijn de vele stuifduinen in het dal en op de dalranden. Rivieroverstromingsvlakten komen in dit traject minder voor en de kleidekken zijn dunner dan in traject A. Halverwege traject B mondt de Regge uit in het Vechtdal en neemt de rivierafvoer verder toe. Vanaf Dalfsen tot het punt waar de rivier uitmondt in het Zwarte Water (traject C) ligt de Vecht in een binnendelta (Fig. 3.16). Vanwege de relatief hoge ligging in het landschap is de Vecht hier bedijkt. De sinuositeit van de geul is hier in vergelijking met de andere trajecten veel lager. Het uiterwaardenlandschap wordt gekenmerkt door oeverwallen in het stroomopwaartse deel van de meanderbochten en kronkelwaardruggen en -geulen in het stroomafwaartse deel.

**Fig 3.16** HET RIVIERLANDSCHAP IN TRAJECT C VAN DE OVERIJSSELSE VECHT (Wolfert & Maas, 2007).



**Holocene fluvial landscape**

- River channel
- Abandoned channel
- Scroll bars and swales
- Natural levee
- Aeolian dunes
- Floodplain flat
- Floodbasin

**Weichselian periglacial and Holocene aeolian landscape**

- Coversand undulations / River terrace
- Open field with plaggen soil
- Aeolian dunes
- Vecht inland delta



Natuurlijk afgesneden meanderbochten komen in dit traject nauwelijks voor. In de laagste delen van de uiterwaard liggen strangen die stroomafwaarts verbonden zijn met de rivier.

Door analyse van historische kaarten is inzicht verkregen in de ontwikkeling van rivierpatronen in het verleden en de snelheid waarmee riviermorphologische processen zich voltrokken. Uit historisch kaartmateriaal, dwarsprofielen en andere gegevens zijn voor de verschillende trajecten diverse morfologische kenmerken van de rivier afgeleid, zoals de gemiddelde meanderlengte, de bochtstraal, de sinusiteit en de migratiesnelheid van de meanderbochten (Tabel 3.3).

**Tabel 3.3 LATERALE EROSIE EN MIGRATIE VAN DE VECHT**

Tussen 1720 en 1890 in twee perioden. De relatieve migratiesnelheid is de afstand waarover de bocht verplaatst is gedeeld door de breedte van de rivier.

PERIODE	Totale geërodeerde oppervlakte (ha)	Gemiddelde migratiesnelheid (m/j)	Relatieve migratiesnelheid (j <sup>-1</sup> )
1720-1850	334	0,46	0,0082
1850-1890	168	0,55	0,0099

**Tabel 3.4 SEDIMENT- EN STROMINGSGEGEVENS**

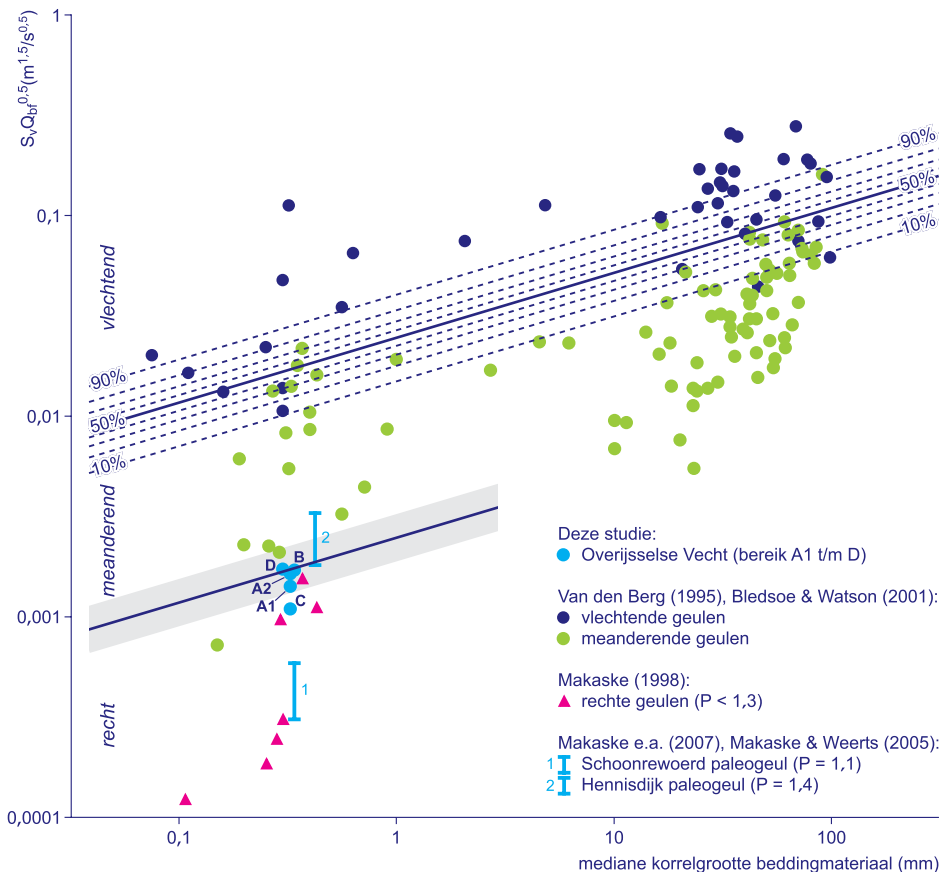
Korrelgrootte van het beddingmateriaal, dalverhang, geulvullende afvoer (berekend) en een energieparameter voor verschillende trajecten van de Overijsselse Vecht.

TRAJECT	D <sub>50</sub> (µm)	S <sub>v</sub>	Q <sub>bf</sub> (m <sup>3</sup> /s)	S <sub>v</sub> √Q <sub>bf</sub> (m <sup>1,5</sup> /s <sup>0,5</sup> )
A1	325	0,00015	90	0,00142
A2	325	0,00015	120	0,00164
B1	340	0,00015	130	0,00171
B2	325	0,00010	150	0,00122
C	300	0,00014	153	0,00173

**Fig 3.17 DE OVERIJSSELSE VECHT IN EEN STABILITEITSDIAGRAM**

Stabiliteitsdiagram waarin voor rechte, meanderende en vlechtende rivieren de energieparameter  $S_v Q_{bf}^{0.5}$  is uitgezet tegen de mediaan van de korrelgrootte van het beddingmateriaal (Bledsoe & Watson, 2001; Makaske et al., 2009) (vergelijk Fig. 2.10).

De diagonale lijnen markeren de overgangen tussen de verschillende riviertypen met een kansverdeling weergegeven rond de overgang meanderend-vlechtend en een onzekerheidsmarge in grijs rond de overgang recht-meanderend. De punten voor de 'natuurlijke' Overijsselse Vecht vallen rond de overgang van recht naar meanderend.



---

### Stap 2 Patroonvoorspelling

In stap 1, de ruimtelijke analyse, zijn in de Vecht drie trajecten onderscheiden. Op basis van verschillen in afvoer zijn de trajecten A en B nader onderverdeeld, zodat voor de patroonvoorspelling en het ontwerp van de morfometrie van de Vecht zich de onderstaande vijf trajecten laten onderscheiden die verschillen in (1) afvoer, (2) oevermateriaal en (3) breedte van de overstromingsvlakte.

- A1: Duitse grens - confluente met afwateringskanaal Coevorden
- A2: Confluente met afwateringskanaal Coevorden - Hardenberg
- B1: Hardenberg - confluente met de Regge
- B2: Confluente met de Regge - Dalfsen
- C: Dalfsen - Zwarte Water

Om een beeld te krijgen van de mate waarin de 'natuurlijke' Vecht geneigd zal zijn tot meanderen zijn de verschillende trajecten op basis van sediment- en stromingsgegevens geplott in een stabiliteitdiagram (Fig. 3.17). In Tabel 3.4 worden  $D_{50}$ ,  $S_v$ ,  $Q_{bf}$  en  $S_v\sqrt{Q_{bf}}$  gegeven voor de verschillende trajecten van de Vecht, zoals die in Figuur 3.17 gebruikt zijn om deze verschillende trajecten te plotten. In Figuur 3.17 is te zien dat de punten voor de Vecht in de overgangszone van rechte naar meanderende geulen plotten.

### Stap 3 Evaluatie van het voorspelde geulpatroon

De ligging van de punten voor de Vecht in de overgangszone van rechte naar meanderende geulen (Fig. 3.17) betekent dat de 'natuurlijke' Vecht waarschijnlijk het karakter van een laag-energetische laaglandrivier zal hebben met een relatief diepe en smalle geul met weinig mobiele bochten. De rivier zal weinig energie beschikbaar hebben voor oevererosie en vorming van meanderbochten. Het kan daarom lang duren voordat de Vecht 'op eigen kracht' een meanderende geul zal hebben gevormd. Dit spreekt voor het aanleggen van een meanderende geul. De bijbehorende dimensies van de geul worden berekend in stap 4.

### Stap 4 Ontwerp van morfometrie

Om de 'natuurlijke' dimensies van de Overijsselse Vecht in de verschillende trajecten te berekenen is gebruik gemaakt van de volgende relaties (Hobo, 2006; Knighton, 1987):

- $w = 4 Q_{bf}^{0,5}$  (bij cohesieve oevers, bereik A)
- $w = 5,62 Q_{bf}^{0,5}$  (bij zandige oevers, bereik B en C)
- $d = 0,58 Q_{bf}^{0,4}$  (bij cohesieve oevers, bereik A)
- $d = 0,54 Q_{bf}^{0,4}$  (bij zandige oevers, bereik B en C)

In deze relaties geldt:

$w$  = geulbreedte (m);

$d$  = geuldiepte (m);

$Q_{bf}$  = 'bankfull' (=geulvullende) afvoer ( $m^3/s$ ).

Verder zijn de meandergolflengte en -amplitude voor de 'natuurlijke' Vecht berekend met de volgende relaties (Hobo, 2006):

- $L_m = 106 Q_{gem}^{0,46}$
- $A_m = 55 Q_d^{0,5}$

In deze relaties geldt:

$L_m$  = meandergolflengte (m);

$A_m$  = meanderamplitude (m);

$Q_{gem}$  = gemiddelde jaarlijkse afvoer ( $m^3/s$ );

$Q_d$  = dominante (d.w.z. geulvormende) afvoer ( $m^3/s$ ).

Als dominante afvoer is in dit geval  $Q_{gem}$  aangenomen.

### Tabel MORFOMETRISCHE KARAKTERISTIEKEN

3.5 Berekende morfometrische karakteristieken van de 'natuurlijke' Overijsselse Vecht.

TRAJECT	$w$ (m)	$d$ (m)	$L_m$ (m)	$A_m$ (m)
A1	38	3,5	411	240
A2	44	3,9	466	275
B1	64	3,8	466	275
B2	69	4,0	585	352
C	70	4,0	585	352

---

De gemiddelde jaarlijkse afvoeren zijn berekend op basis van de beschikbare afvoergegevens van de Vecht. Als schatting van  $Q_{bf}$  is  $Q_{1.58}$  genomen. Toepassing van morfometrische relaties op de verschillende trajecten van de Vecht leidt tot de uitkomsten die in [Tabel 3.5](#) worden gegeven.

#### *Stap 5 Ruimtelijke inpassing*

De morfometrie van een 'natuurlijke' Vecht is vergeleken met gegevens van de dimensies van meanders van de historische Vecht (Wolfert & Maas, 2007). De berekende waarden komen in orde van grootte overeen met de historische gegevens van een generatie vroegere meanders in de as van het Vechtdal. De historische meanders die hier en daar sterk het, naast het Vechtdal liggende, dekzandlandschap hebben geërodeerd zijn van een andere orde. Hun forse dimensies hebben waarschijnlijk te maken met het inwaaien van veel zand in het verleden ([Fig. 3.18](#); Wolfert & Maas, 2007).

---

#### **Fig**      **INSTUIVING VAN ZAND**

**3.18**      *Een foto bij een krantenartikel uit de veertiger jaren van de vorige eeuw toont instuiving van zand in een afgesneden Vechtbedding.*



Omdat de eolische activiteit nu zeer beperkt is, is ervoor gekozen om het geulontwerp voor het streefbeeld (Fig. 3.19) zoveel mogelijk aan te laten sluiten bij de historische meanders in de as van het Vechtdal. Waar dit niet kan zijn de in stap 4 berekende meanderdimensies richtinggevend geweest voor het ontwerp. In bereik C, zijn de meanderdimensies sterk beïnvloed door de bedijking en kleiner (vooral de amplitude) dan de berekende waarden in Tabel 3.5. Omdat vanwege de veiligheid de bedijking gehandhaafd wordt, is er voor dit bereik geen aangepast ontwerp op basis van Tabel 3.5. Naast hermeandering van de geul zijn in het project vijf andere bouwstenen gedefinieerd die nodig zijn om de Vecht om te vormen van een gestuwde en gekanaliseerde rivier naar een hoogwaterveilige en landschapelijk aantrekkelijke half-natuurlijk laaglandrivier:

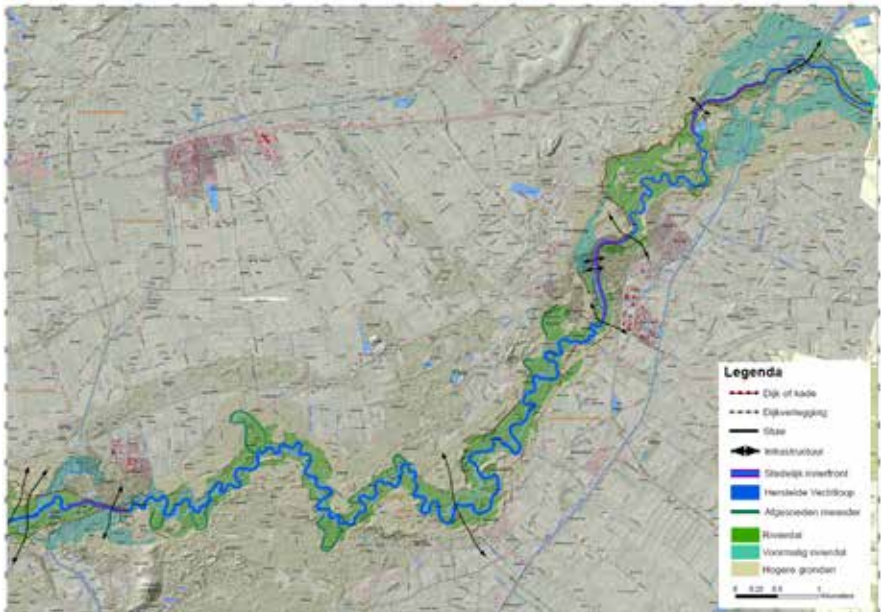
- stuwpasserende nevengeulen;
- half-natuurlijk stuwbeheer, dat wil zeggen een stuwbeheer dat is aangepast aan de veranderde inrichting van de dalvlakte (voor de Overijsselse Vecht betekent dit het loslaten van het omgekeerde peilbeheer waarin 's zomers een hoger peil dan 's winters wordt gehandhaafd);
- zonering van het vegetatiebeheer in het rivierdal;
- verwijdering van hydraulische obstakels in de dalvlakte;
- ontwikkeling van stedelijke rivierfronten bij de woonkernen.

In de praktijk van herstel van riviersystemen komt het slechts zelden voor dat een hele rivier ineens aangepakt kan worden. Veel vaker doen zich telkens, en op kleine schaal, kansen voor die de waterbeheerder benut. Ook de realisatie van de Vecht als half-natuurlijke laaglandrivier zal zich waarschijnlijk volgens dit patroon ontwikkelen. De mogelijkheden voor herstel worden vaak bepaald door omstandigheden in andere sectoren. Bij de integrale planvorming rond de Vecht zijn de landbouw en de recreatievaart van invloed op de ontwikkelingsmogelijkheden. Afhankelijk van de toekomstige veranderingen in deze sectoren (transities) kunnen diverse stappen in de ontwikkeling van het streefbeeld onderscheiden worden (Fig. 3.20). Bij weinig transitie wordt half-natuurlijk stuwbeheer alleen daar toegepast waar weinig recreatievaart is, en waar de effecten op de omgeving via het grondwater relatief gering zijn (streefbeeld 1). Doen zich transities voor met betrekking tot de scheepvaart, dan kan half-natuurlijk stuwbeheer ook ingevoerd worden in de benedenstroomse trajecten (streefbeeld 2). En bij een andere landbouwsituatie (minder intensief landbouwkundig gebruik) ontstaan juist mogelijkheden bovenstrooms. Het half-natuurlijk stuwbeheer kan daar mogelijk zo ver

gaan dat de stuwen overbodig worden (streefbeeld 3). Combinatie van alle veranderingen leidt uiteindelijk tot de transformatie van de Vecht in een half-natuurlijke laaglandrivier (streefbeeld 4).

**Fig**      **STREEFBEELD OP KAART**

**3.19**      *Ruimtelijk ingepast ontwerp voor het streefbeeld van een half-natuurlijke Vecht van de Duitse grens tot Ommen.*

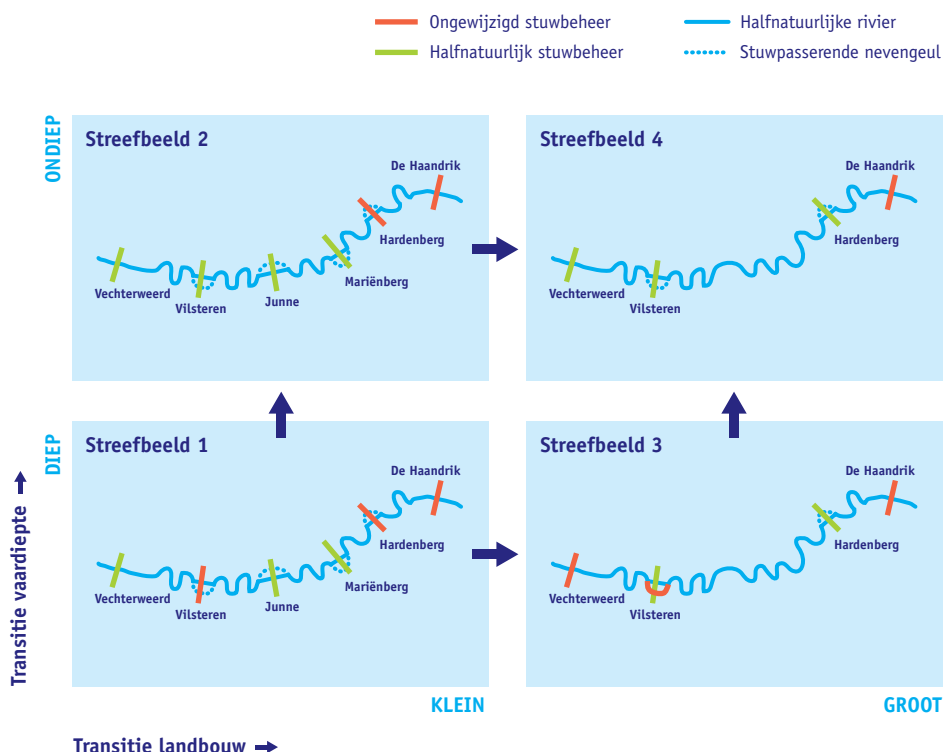


*Stap 6 Hydraulische en hydrologische toetsing*

Voor de Vecht is een eenvoudig hydraulisch model gemaakt waarmee het effect van maatregelen, zoals hermeanderen en het verbreden van de Vechtgeul, snel kan worden doorgerekend. De stuwkromme-vergelijking vormt de basis voor de hydraulische berekening. De geometrische gegevens voor het model zijn overgenomen uit het bestaande SOBEK-model van de Vecht. Het eenvoudige model is afgeregeld op de resultaten van het SOBEK-model voor enkele permanente stromingsomstandigheden.

**Fig 3.20** **ONTWIKKELINGSPADEN**

Mogelijke stappen in de ontwikkeling van het streefbeeld van de Vecht naar een half-natuurlijke laaglandrivier als functies van transitie in landbouw en vaardiepte.



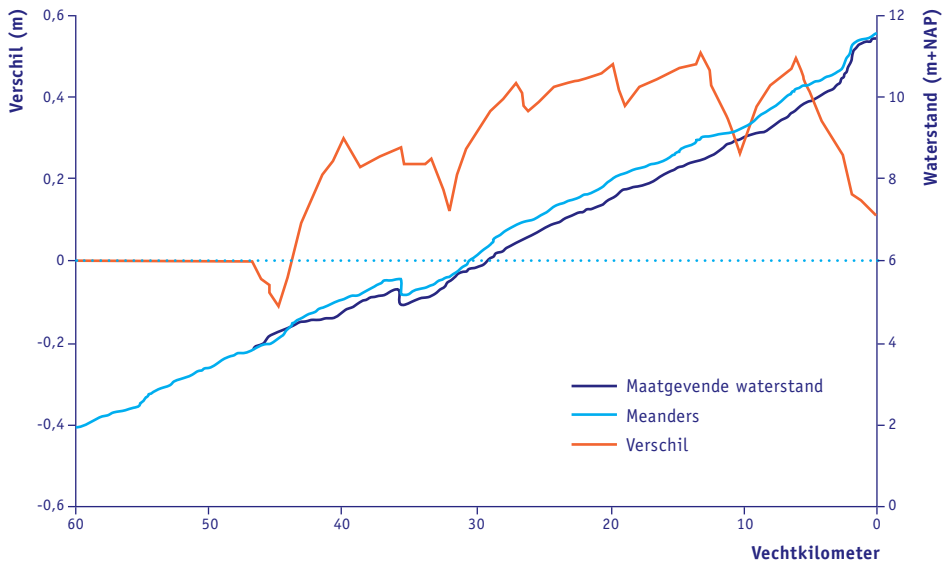
De verschillende stappen in de ontwikkeling van het streefbeeld (Fig. 3.20) zijn met het model hydraulisch getoetst. In Figuur 3.21 is voor streefbeeld 4 de berekende waterstand weergegeven op de top van de afvoergolf met een herhalingsstijd van 200 jaar ( $T=200$ ). In dit streefbeeld meandert de bedding, zijn twee van de zes stuwen in de Vecht opgeheven en zijn twee andere stuwen voorzien van een stuwpasserende nevengeul. Op de dalvlakte is in dit streefbeeld ruimte binnen bepaalde zones voor een natuurlijke vegetatieontwikkeling. Uit de hydraulische toets blijkt dat de waterhoogten bij dit streefbeeld boven de maatgevende afvoer uitstijgen. Staan we geen natuurlijke ontwikkeling van de vegetatie toe dan liggen



de waterstanden tijdens een hoge afvoer ( $T=200$ ) dicht bij de maatgevende waterstand (Fig. 3.22). Tenslotte is berekend wat het effect is van een inrichting waarbij de oude gekanaliseerde loop van de Vecht niet helemaal gedempt wordt, maar als hoogwatergeul achterblijft in het landschap, terwijl de vegetatie in het dal zich natuurlijk kan ontwikkelen (Fig. 3.23). Deze inrichting voldoet aan de randvoorwaarde van hoogwaterveiligheid.

**Fig 3.21 WATERSTAND BIJ HOOGWATER MET VEGETATIEONTWIKKELING IN DE DALVLAKTE/UITERWAARD**

Waterstand langs de herstelde half-natuurlijke Vecht voor streefbeeld 4 bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 200 jaar ( $T=200$ ) (lichtblauwe lijn), de maatgevende waterstand en het waterstandsverschil. In deze berekening is een natuurlijke ontwikkeling van de vegetatie in het rivierdal/de uiterwaard als uitgangspunt genomen.

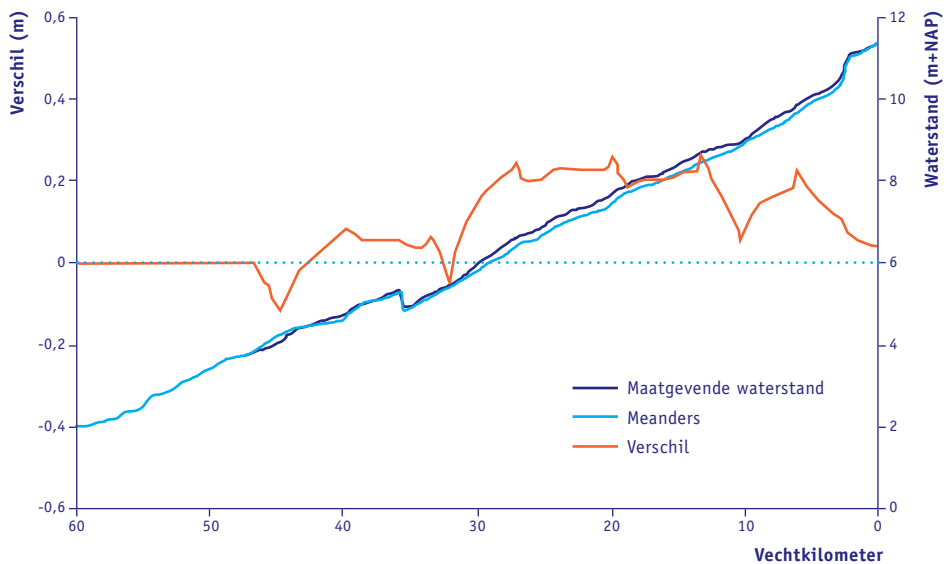


Het meanderende patroon en de nieuwe dimensies van de bedding brengen ook andere stroomsnelheden met zich mee. Voor de rivierkundige processen als afkalving van oevers en vorming van zandbanken is bekend dat de stroomsnelheid bij geulvul-

lende afvoer (die eens per 1 à 2 jaar voorkomt) een goede maat is voor de dynamiek van de rivier. Uit de hydraulische berekeningen blijkt dat de meanders bij geulvullende afvoer resulteren in lagere stroomsnelheden (Fig. 3.24). Dat komt overeen met het beeld van het type rivier dat de Vecht als half-natuurlijke laaglandrivier zou kunnen zijn: een rivier met een meanderende loop, die echter maar weinig energie beschikbaar heeft voor oevererosie en de verplaatsing van meanderbochten.

**Fig 3.22 WATERSTAND BIJ HOOGWATER ZONDER VEGETATIEONTWIKKELING IN DE DALVLAKTE/UITERWAARD**

Waterstand langs de herstelde half-natuurlijke Vecht voor streefbeeld 4 bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 200 jaar ( $T=200$ ) (lichtblauwe lijn), de maatgevende waterstand en het waterstandsverschil. In deze berekening is de huidige ontwikkeling van de vegetatie in het rivierdal/de uiterwaard als uitgangspunt genomen.

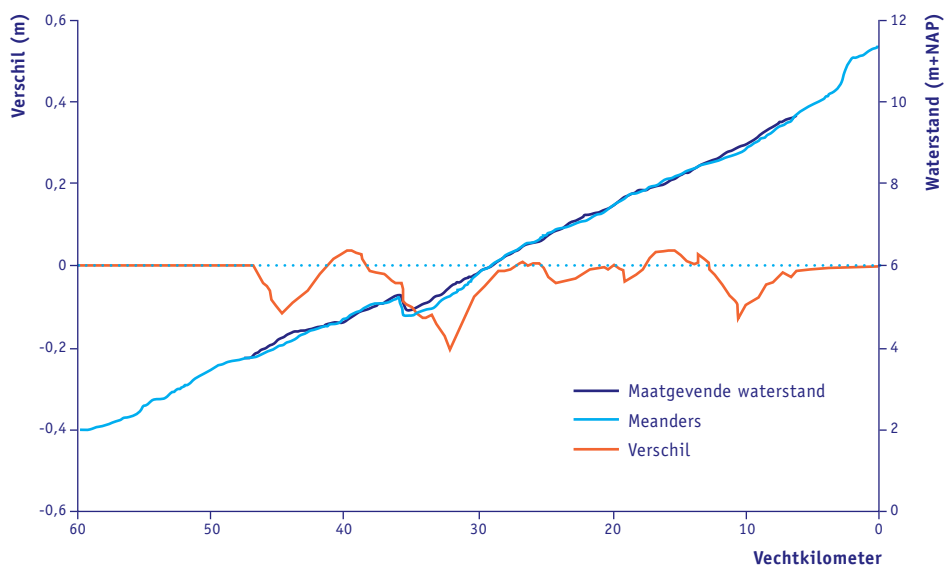


Om een indruk te krijgen van de effecten van het ontwerp van een meanderende rivier op de sedimenttransportcapaciteit van de Vecht, zijn berekeningen uitgevoerd met behulp van de sedimenttransportformule van Engelund & Hansen

(1967) (paragraaf 2.7). De berekeningen zijn uitgevoerd voor de huidige situatie en voor de ontworpen ‘natuurlijke’ Vecht bij geulvullende afvoer (hiervoor is  $Q_{2,0}$  aangenomen). In [Figuur 3.25](#) is te zien dat het sedimenttransport in de ‘natuurlijke’ Overijsselse Vecht in de meeste bereiken lager is dan in de huidige Overijsselse Vecht. Dit komt voornamelijk door de lagere geulgradiënt van de ‘natuurlijke’ Vecht, die zorgt voor lagere stroomsnelheden.

**Fig 3.23 WATERSTAND BIJ HOOGWATER MET VEGETATIEONTWIKKELING IN DE DALVLAKTE/UITERWAARD EN EEN HOOGWATERGEUL**

Waterstand langs de herstelde half-natuurlijke Vecht voor streefbeeld 4 bij een afvoergolf met een herhalingsstijd van 200 jaar ( $T=200$ ) (lichtblauwe lijn), de maatgevende waterstand en het waterstandsverschil. In deze berekening is een natuurlijke ontwikkeling van de vegetatie in het rivierdal/de uiterwaard als uitgangspunt genomen en krijgt de gekanaliseerde loop van de rivier de functie van hoogwatergeul.

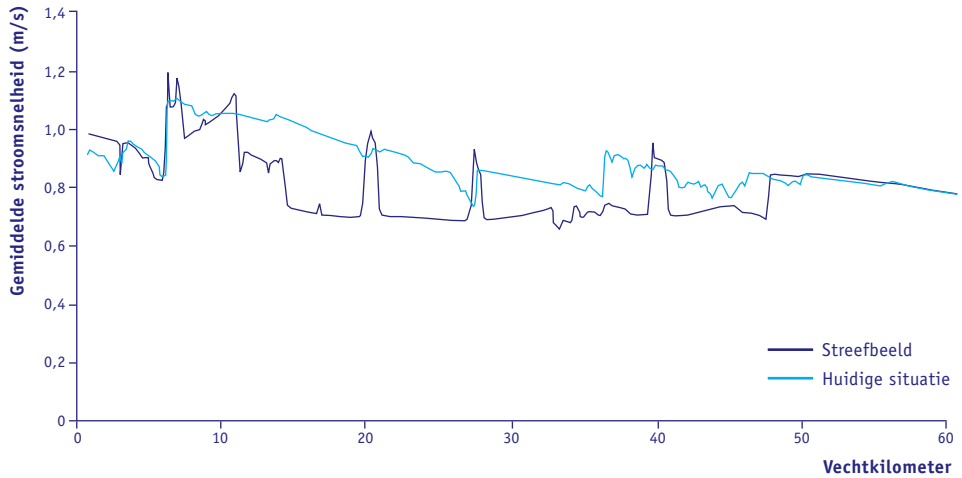


**Stap 7 Het plannen van monitoring en beheer**

In het geval van de Overijsselse Vecht is deze stap (nog) niet uitgevoerd.

**Fig 3.24 VERANDERING IN STROOMSNELHEID**

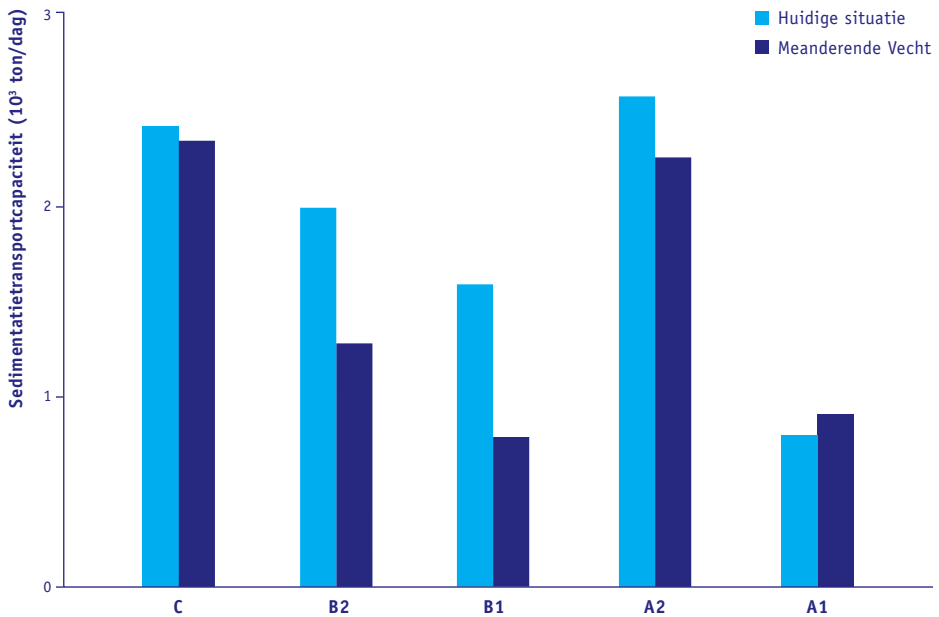
Stroomsnelheid bij geulvullende afvoer ( $Q_{2,0}$ ) in een meanderende geul volgens het streefbeeld en in de huidige gekanaliseerde situatie.



---

**Fig** VERANDERING IN SEDIMENTTRANSPORT**3.25**

Sedimenttransport bij  $Q_{2,0}$  in de verschillende bereiken van de Overijsselse Vecht, berekend met de Engelund-Hansen-formule voor de huidige situatie (lichtblauw) en voor de 'natuurlijke' Vecht (donkerblauw).



---

**Evaluatie**

Het ontwerpproces voor het herstel van de Overijsselse Vecht is nog gaande en verloopt deels parallel aan de uitvoering van herstelwerkzaamheden in beperkte trajecten. Dit maakt een integrale evaluatie van het ontwerpproces onmogelijk. Een sterk punt van het ontwerpproces tot dusverre is dat de volledige lengte van de rivier in Nederland (en deels ook het direct stroomopwaartse Duitse traject) in het proces wordt betrokken. Een nadeel is dat compromissen tussen hoogwaterveiligheid en vaardiepte enerzijds en geomorfologische kwaliteiten anderzijds noodzakelijk zijn, waardoor het ontwerpproces zich voorlopig niet kan richten op een volledig natuurlijk geomorfologisch evenwicht.



---

# LITERATUUR EN BIJLAGEN

---

## AANGEHAALDE LITERATUUR

---

- Anderson R.J., B.P. Bledsoe & W.C. Hession (2004) Width of streams and rivers in response to vegetation, bank material, and other factors. *Journal of the American Water Resources Association* 40 (5), pp. 1159-1172.
- Bal, D., H.M. Beije, Y.R. Hoogeveen, S.R.J. Jansen & P.J. van der Reest (1995) *Handboek natuurdoeltypen in Nederland*. Informatie- en Kenniscentrum Natuurbeheer, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Wageningen, 408 p.
- Bal, D., H.M. Beije, M. Felliger, R. Haveman, A.J.F.M. van Opstal & F.J. van Zadelhoff (2001) *Handboek natuurdoeltypen*. Rapport Expertisecentrum LNV 2001/020, Wageningen, 832 p.
- Berg, J.H. van den (1993) A new bedform stability diagram, with emphasis on the transition of ripples to plane bed in flows over fine sand and silt. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists* 17, Blackwell, Oxford, pp. 11-21.
- Berg, J.H. van den (1995) Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology* 12, pp. 259-279.
- Berg, J.H. van den & A. van Gelder (1993) Prediction of suspended bed material transport in flows over silt and very fine sand. *Water Resources Research* 29, pp. 1393-1404.
- Bledsoe, B.P. & C.C. Watson (2001) Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising. *Geomorphology* 38, pp. 281-300.
- Brownlie, W.R. (1983) Flow depth in sand-bed channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 109, pp. 959-990.
- Carlston, C.A. (1965) The relation of free meander geometry to stream discharge and its geomorphic implications. *American Journal of Science* 263, pp. 864-885.
- Chow, V.T. (1959) *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- Eekhout, J.P.C., A.J.F. Hoitink & B. Makaske (2013) Historical analysis indicates seepage control on initiation of meandering. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, pp. 888-897.
- Eekhout, J. & T. Hoitink (2014) *Morfodynamiek van Nederlandse laaglandbeken*. STOWA-rapport 2014-15, STOWA, Amersfoort, 92 p.
- Engelund, F. & E. Hansen (1967) *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Europese Unie (2000) *Richtlijn 2000/60/EG van het Europees Parlement en de Raad*



- 
- van 23 oktober 2000 tot vaststelling van een kader voor communautaire maatregelen betreffende het waterbeleid. Publicatieblad Nr. L 327 van 22/12/2000 blz. 0001 – 0073.
- FISRWG (1998) Stream corridor restoration; principles, processes and practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group, US Government.
- Hey, R.D. & C.R. Thorne (1986) Stable channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 112 (8), pp. 671-689.
- Hobo, N. (2006) Hydraulische effecten van verschillende inrichtingsscenario's voor de Overijsselse Vecht; een verkennende studie met behulp van een SOBEK-model. Rapport, Alterra, Wageningen, 85 p.
- Hommel, P.W.F.M., A.H. Prins & H.P. Wolfert (1996) Stroomdalgraslanden en rivierdynamiek; behoud en ontwikkeling van bloemrijke graslanden langs de Boven-Dinkel. *Landschap* 13 (4), pp. 299-316.
- Kleinans, M.G. & J.H. van den Berg (2011) River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method, *Earth Surface Processes and Landforms* 36, pp. 721-738.
- Knighton, A.D. (1987) River channel adjustments; the downstream dimension. In: K. Richards (ed.), *River channels; environment en process*. Institute of British Geographers, Special Publication 18, pp. 95-128.
- Koomen, A.J.M. & G.J. Maas (2004) Geomorfologische Kaart Nederland (GKN); achtergronddocument bij het landsdekkende digitale bestand. Alterra-rapport 1039, Alterra, Wageningen, 38 p.
- Leopold, L.B. & T. Maddock (1953) The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey Professional Paper* 252, Washington, 56 p.
- Leopold, L.B. & M.G. Wolman (1960) River meanders. *Bulletin of the Geological Society of America* 71, pp. 769-794.
- Ligtvoet W., G. Beugelink, C. Brink, R. Franken & F. Kragt (2008) Kwaliteit voor later; ex ante evaluatie Kaderrichtlijn Water. Planbureau voor de Leefomgeving, Bilthoven, 212 p.
- Maas, G.J., B. Makaske, P.W.F.M. Hommel, B.S.J. Nijhof & H.P. Wolfert (2003) Verstorring en successie; rivierdynamiek en stroomdalvegetaties in de uiterwaarden van de Rijntakken. Alterra-rapport 759, Alterra, Wageningen, 100 p.
- Makaske, B. (1998) Anastomosing rivers; forms, processes and sediments. *Nederlandse Geografische Studies* 249, Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap / Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht,

---

Utrecht, 298 p.

- Makaske, B. (2001) Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth-Science Reviews* 53, pp. 149-196.
- Makaske, B. & R.L. Nap (1995) A transition from a braided to a meandering channel facies, showing inclined heterolithic stratification (Late Weichselian, central Netherlands), *Geologie en Mijnbouw* 73 (2), pp. 1-8.
- Makaske, B. & H.J.T. Weerts (2005) Muddy lateral accretion and low stream power in a subrecent confined channel belt, Rhine-Meuse delta, central Netherlands. *Sedimentology* 52 (3), pp. 651-668.
- Makaske, B., Berendsen, H.J.A. & M.H.M. van Ree (2007) Middle Holocene avulsion-belt deposits in the central Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Journal of Sedimentary Research* 77 (2), pp. 110-123.
- Makaske, B., D.G. Smith, H.J.A. Berendsen, A.G. de Boer, M.F. van Nielen-Kiezebrink & T. Locking (2009) Hydraulic and sedimentary processes causing anastomosing morphology of the upper Columbia River, British Columbia, Canada. *Geomorphology* 111, pp. 194-205.
- Makaske, B., M. Kleinhans & E. van der Deijl (in voorbereiding) Het natuurlijke patroon van beken: slingeren of meanderen? Ongepubliceerd manuscript.
- Middelkoop, H., E. Stouthamer, M.M. Schoor, H.P. Wolfert & G.J. Maas, (2003) Kansrijkdom voor rivierecotopen vanuit historisch-geomorfologisch perspectief; Rijntakken, Maas, Benedenrivieren. NCR-publication 21-2003, Nederlands Centrum voor Rivierkunde, Delft, 124 p.
- Ministerie van LNV (1990) Natuurbeleidsplan; regeringsbeslissing. Tweede Kamer, vergaderjaar 1989-1990, 21149, nrs. 2-3, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Den Haag.
- Ministerie van LNV (2000) Natuur voor mensen, mensen voor natuur; nota natuur, bos en landschap in de 21e eeuw. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Den Haag, 58 p.
- Ministerie van LNV (2006) Natura 2000 doelendocument; duidelijkheid bieden, richting geven en ruimte laten. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, Den Haag, 228 p.
- Ministerie van V&W (1985) Nota omgaan met water. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van V&W (1989) Derde nota waterhuishouding; water voor nu en later. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Ministerie van V&W (1998) Vierde nota waterhuishouding. Ministerie van Ver-

---

keer en Waterstaat, Den Haag.

Ministerie van V&W (2000) Anders omgaan met water; waterbeleid voor de 21e Eeuw. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

Ministerie van V&W (2009) Nationaal Waterplan 2009-2015. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

Ministerie van V&W, UvW, IPO, VNG, (2003) Nationaal Bestuursakkoord Water. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Unie van Waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Vereniging van Nederlandse Gemeenten.

Ministerie van V&W, UvW, IPO, VNG, (2008) Nationaal Bestuursakkoord Water-Actueel. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Unie van Waterschappen, Interprovinciaal Overleg, Vereniging van Nederlandse Gemeenten.

Nanson, G.C. & J.C. Croke (1992) A genetic classification of floodplains. *Geomorphology* 4, pp. 459-486.

Nijssen, D., E. Demeulenaere & M. Heyn (2002) Langetermijnvisie gebiedsgericht natuurbehoud in Vlaanderen. Universitaire Instelling Antwerpen, Antwerpen, 301 p.

Olde Venterink, H. (2000) Nitrogen, phosphorus and potassium flows controlling plant productivity and species richness; eutrophication and nature management in fens and meadows. Dissertatie, Utrecht University, Utrecht, 151 p.

Petts, G.E. & C. Amoros (Red.) (1996) Fluvial hydrosystems. Chapman & Hall, London, 336 p.

Querner, E.P. (1995) De stromingsweerstand en de berekening van de afvoer in begroeide waterlopen. *Het Waterschap* 80 (9), pp. 350-355.

Querner, E.P. & B. Makaske (2012) Verkenning van stromingsweerstand; de hydraulische ruwheid van enkele natuurlijke uiterwaardvegetaties. *Alterra-rapport* 2355, Alterra, Wageningen, 38 p.

Reeze, B. & J. Lenssen (2015) Handleiding voor de monitoring van beekherstelprojecten. *STOWA-rapport* 2015-11, STOWA, Amersfoort.

Rijn, L.C. van (1984a) Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110, pp. 1431-1456.

Rijn, L.C. van (1984b) Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110, pp. 1613-1641.

Rijn, L.C. van (1993) Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam/Oldemarkt.

Rijn, L.C. van (1994) Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans. Second edition. Aqua Publications, Amsterdam/Oldemarkt, 335 p.

- 
- Runhaar, H. & P.C. Jansen (2004) Overstroming en vegetatie; vergelijkend onderzoek in vijf beekdalallocaties. Alterra-rapport 1079, Alterra, Wageningen, 77 p.
- Schipper, P. & H.N. Siebel (Red.) (2009) Index Natuur en Landschap, onderdeel natuurbeheertypen; versie 0.4 15 juni 2009. Terreinbeheerders, IPO en LNV.
- Schumm, S.A. (1977) The fluvial system. Wiley, New York, 338 p.
- Soar, P.J. & C.R. Thorne (2001) Channel restoration design for meandering rivers. US Army Corps of Engineers, Washington DC, 416 p.
- UNEP (1992) Rio Declaration on Environment and Development, United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, United Nations Environment Programme.
- USACE (1994) Analyzing employment effects of stream restoration investments. Report CPD-13, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Alexandria, Virginia.
- Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen & H. Coops (2003) Stromingsweerstand in uiterwaarden; deel 1 handboek versie 1-2003. RIZA rapport 2003.028, RIZA, Arnhem, 134 p.
- Verdonschot, P., A. Besse, J. de Brouwer, J. Eekhout & R. Fraaije (2012) Beekdalbreed hermeanderen: bouwstenen voor de 'leidraad voor innovatief beek- en beekdalherstel'. STOWA-rapport 2012-36, STOWA, Amersfoort, 56 p.
- Vos, C.C., B.S.J. Nijhof, M. van der Veen, P.F.M. Opdam & J. Verboom (2007) Risicoanalyse kwetsbaarheid natuur voor klimaatverandering. Alterra-rapport 1551, Alterra, Wageningen, 76 p.
- Vries, F. de, W.J.M. de Groot, T. Hoogland & J. Denneboom (2003) De Bodemkaart van Nederland digitaal; toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-rapport 811, Alterra, Wageningen, 48 p.
- Waterschap Regge en Dinkel (2009a) Stroomgebiedactieplan Hagmolenbeek, 2009-2019; versie mei 2009. Intern document Waterschap Regge en Dinkel, Almelo, 170 p.
- Waterschap Regge en Dinkel (2009b) Waterbeheerplan 2010-2015. Waterschap Regge en Dinkel, Almelo, 200 p.
- Waterschap Regge en Dinkel (2012) Herinrichting waterlichaam Hagmolenbeek deeltraject nabij Beckum: Projectplan; versie 11 juni 2012. Intern document Waterschap Regge en Dinkel, Almelo, 35 p.
- Williams, G.P. (1986) River meanders and channel size. Journal of Hydrology 88, pp. 147-164.

- 
- Wolfert, H.P. (2001) Geomorphological change and river rehabilitation; case studies on lowland fluvial systems in the Netherlands. *Alterra Scientific Contributions* 6, Alterra, Wageningen, 200 p.
- Wolfert, H.P. & G.J. Maas (2007) Downstream changes of meandering styles in the lower reaches of the River Vecht, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw* 86, pp. 257-271.
- Wolfert, H.P., P.W.F.M. Hommel, A.H. Prins & M.H. Stam (2002) The formation of natural levees as a disturbance process significant to the conservation of riverine pastures. *Landscape Ecology* 17 (Suppl. 1), pp. 47-57.
- Wolfert, H., A. Corporaal, G. Maas, K. Maas, B. Makaske & P. Termes (2009) Toekomst van de Vecht als een halfnatuurlijke laaglandrivier; bouwstenen bij de grensoverschrijdende Vechtvisie 2009. *Alterra-rapport 1897*, Alterra, Wageningen, 32 p.
- Wolters, H.A., M. Platteeuw & M.M. Schoor (2001) Richtlijnen voor inrichting en beheer van uiterwaarden; ecologie en veiligheid gecombineerd. *RIZA rapport 2001.059*, RIZA, Arnhem/Lelystad.

---

## BIJLAGE 1

### NATUURBEHEERTYPEN VOOR BEKEN EN BEEKDALEN UIT DE INDEX NATUUR EN LANDSCHAP

---

In de Index Natuur en Landschap (Schipper & Siebel, 2009) worden 47 natuurbeheertypen voor Nederland onderscheiden. Hieronder volgt een beschrijving van de zeven beheertypen die het meest relevant zijn voor beken en beekdalen. De beschrijving is ontleend aan Schipper & Siebel (2009) en heeft slechts kleine redactionele wijzigingen ondergaan. In [Tabel B1.1](#) (volgende bladzijde) worden de beheertypen voor beken en beekdalen ‘vertaald’ naar Programma Beheer-eenheden en natuurdoeltypen volgens Bal *et al.* (2001). De Programma Beheer-eenheden waren subsidieerbare eenheden die geformuleerd waren op basis van de natuurdoeltypen. De nieuwe eenheden van de Index Natuur en Landschap vervangen de oude eenheden van Programma Beheer.

---

#### N01.04 ZAND- EN KALKLANDSCHAP

##### Algemene beschrijving

*Zand- en kalklandschap* omvat de meer natuurlijke gebieden in het zand- en het kalklandschap waar vooral grondwaterstandsfluctuaties, successie en waterdynamiek van beken in combinatie met integrale begrazing het landschap vormen. Al naar gelang de ligging van het gebied bestaat het uit een groot scala van andere in zand- en kalkgebieden voorkomende beheertypen (zoals *Beek en bron*, *Hoogveen*, *Vochtige heide*, *Zuur ven of hoogveenven*, *Droge heide*, *Droog schraalland*, *Haagbeuken- en essenbos* en *Dennen-, eiken- en beukenbos*) die echter vanwege continue veranderingen in het landschap niet in omvang en ligging apart in het beheer kunnen worden vastgelegd.

Om natuurlijke processen in dit beheertype het landschap te kunnen laten bepalen is een grote oppervlakte nodig. Er is hiervoor in Nederland slechts weinig ruimte overgebleven. De natuurwaarden hangen vooral samen met de variatie in de ruimtelijke gradiënt in vochthuishouding en successiestadia. Bij ontwikkeling vanuit een in het recente verleden intensief geëxploiteerd landschap zijn met name oude ontwikkelingsstadia met bijvoorbeeld dikke en dode bomen van belang voor de biodiversiteit. Naar verloop van tijd wordt het voldoende ontstaan van pionierssituaties voor de biodiversiteit belangrijk, die door begrazing ook lan-

**Tabel NATUURBEHEERTYPEN VOOR BEKEN EN BEEKDALEN**

**B1.1** De relatie tussen natuurtypen en beheertypen (*Index Natuur en Landschap*), Programma Beheer-pakketten en natuurdoeltypen.

NATUURTYPEN	BEHEERTYPEN	PROGRAMMA BEHEER	NATUURDOELTYPEN
N01 Grootschalige dynamische natuur	N1.04 Zand- en kalklandschap	21A/B Natuurlijke eenheid	2.3 Begeleid-natuurlijk beekdallandschap
N02 Rivieren	N02.01 Rivier	24 Beek en duinrel	3.9 Snelstromende rivier en nevengeul 3.10 Langzaam stromende rivier en nevengeul 3.16 Dynamisch rivierbegeleidend water 3.11 Zoet getijdewater 4(x) afgeleide natuurdoeltypen
N03 Beken en bronnen	N03.01 Beek en bron	24 Beek en duinrel	3.1 Droogvallende bron en beek 3.3 Snelstromende bovenloop 3.4 Snelstromende midden- en benedenloop 3.5 Snelstromend riviertje 3.6 Langzaam stromende bovenloop 3.7 Langzaam stromende midden- en benedenloop 3.8 Langzaam stromend riviertje 3.2 Permanente bron 4(x) afgeleide natuurdoeltypen
N10 Vochtige schraalgraslanden	N10.01 Nat schraalland	28A Nat soortenrijk grasland	3.30 Dotterbloemgraslanden van beekdalen
	N10.02 Vochtig hooiland	28A Nat soortenrijk grasland	3.31 Dotterbloemgraslanden van veen en klei
N11 Droge schraallanden	N11.01 Droog schraalland	29C Droog soortenrijk grasland	3.39a Stroomdalgrasland
N14 Vochtige bossen	N14.01 Rivier- en beekbegeleidend bos	20 Bos	3.67b Beekbegeleidende bossen 3.67a Bronbos

---

ger aanwezig kunnen blijven. Over de mate waarin begrazing in dit landschapstype een rol speelt in relatie tot de biodiversiteit is nog veel onbekend, omdat dit landschapstype in Europa al lange tijd niet meer voorkomt en er slechts recent gestart is met de ontwikkeling ervan. De mate waarin bomen het landschapsbeeld in dit verband zullen domineren is nog onzeker maar zal naar waarschijnlijkheid in ruimte en tijd fluctueren.

Karakteristieke soorten zijn die welke voor de andere beheertypen van zand- en kalkgebieden genoemd zijn. Specifieke soorten die als karakteristiek voor het grootschalig voorkomen van dit type kunnen worden gezien zijn nog grotendeels onbekend, maar omvatten waarschijnlijk een aantal grote roofvogels en toppredatoren als de lynx. Verder zijn meer natuurlijke dichtheden van wild zwijn en edelhert van belang.

#### Afbakening

- Het beheertype *Zand- en kalklandschap* is gelegen in de Zandlandschappen of het Heuvellandschap en omvat in tijd en ruimte wisselende in dit landschap thuishorende typen.
- Het landschap wordt gevormd door natuurlijke processen zoals de werking van wind, water (o.a. periodiek hoge grondwaterstanden) en/of grote grazers.
- De tot dit type behorende eenheid is tenminste 500 ha groot of maakt onderdeel uit van een groter gebied behorend bij grootschalige dynamische natuur.

#### Voorbeeldgebieden

Veluwezoom.

---

## N02.01 RIVIER

### Algemene beschrijving

*Rivier* omvat al het stromend water van de Rijn en haar zijtakken, de Maas en de Overijsselse Vecht. Het gaat om alle buitendijkse wateren met hun oevers in de uiterwaarden van deze rivieren. Iedere rivier en ieder riviertraject heeft een eigen karakter. De Grensmaas heeft een wat groter verval, stroomt daardoor wat sneller en heeft grindoevers. Niers, Roer (zijtakken van de Maas) en Overijsselse Vecht zijn kleine rivieren met in de zomer soms weinig wateraanvoer. De Rijn met haar zijtakken heeft in de zomer een wat constantere wateraanvoer. De rivieren in het



---

oosten en het zuiden stromen door zandige gebieden, meanderen breed en hebben vrij hoge zandige oeverwallen. De rivieren in de Betuwe liggen in komkleigebieden, meanderen wat minder en liggen tegenwoordig hoog in het landschap. De westelijke rivieren vormen een netwerk, zijn breed, stromen heel traag en zijn te beschouwen als zoetwatergetijderivieren.

De variatie in stroomsnelheid en waterkwaliteit is groot, in afgesnoerde strangen en wielen staat het water stil terwijl de stroming in buitenbochten van de rivier juist groot is. De stilstaande wateren kunnen dichtslibben en verlanden, bij hoog water in de winter kan de geul weer uitschuren. In de zomer kunnen de oevers en stranden breed zijn en begroeid raken met pioniers als slijkgroen. De stilstaande wateren in de uiterwaarden, zoals oude geulen, afgesneden meanders en wielen, lijken veel op het beheertype *Zoete plas*. Juist deze afwisseling en verandering zorgen voor een hoge diversiteit.

Rivieren zijn internationaal en nationaal van groot belang als leefgebied voor trekvogels, vissen, libellen, kokerjuffers, steenvliegen en haften. Het gaat bijvoorbeeld om rivierrombout, bataafse stroommossel, platte zwanenmossel, bever, barbeel, kopvoorn, rivierdonderpad, meerval, riviergrondel, sneep, winde, rivierprik, zeeprik en aal. Vooral voor trekvissen is het internationale belang groot. De trekvissen elft, fint, houting, steur en zalm komen in Nederland vrijwel niet meer voor. Slechts enkele waterplanten komen voor in de rivier zelf: rivierfonteinkruid, doorgroeid fonteinkruid (nu alleen in kleine rivieren) en vlottende waterranonkel (in de Grensmaas).

Het karakter van *Rivier* is blijvend veranderd. De versnelde afvoer van water en hogere piekafvoeren worden veroorzaakt door de ontginning van de oorspronggebieden, de veranderingen in klimaat, de bedijkingen en het rechtrekken van stroomgeulen. Kribben en versteende oevers verhinderen erosie. Zandwinputten en grindgaten zijn zeer diep en veranderen het proces van sedimentatie van zand en slib en stroming van oppervlakte- en grondwater. Door afdammingen langs de kust is de invloed van het getij verminderd. De getijdeslag was vroeger merkbaar tot de lijn Wijk bij Duurstede-Tiel-Oss.

Door vergroting van de overstromingsvlakten, verbetering van waterkwaliteit, verbetering van de mogelijkheden voor vistrek, verbetering van de aansluitingen op beken, vergroting van de variatie in verschillende typen water en het spontaan

---

laten ontstaan van zandige oevers kan echter veel gewonnen worden. Vooral de kleine rivieren bieden hiervoor perspectief.

### Afbakening

- Het beheertype *Rivier* omvat alle wateren (incl. strangen, grindgaten en oude rivierlopen) in de buitendijkse gebieden van Maas, Roer, Niers, Bergse Maas, Afdamde Maas, Nederrijn, Lek, Nieuwe Maas, Waal, Merwede, Amer, Oude Maas, Nieuwe Waterweg, Rijn, IJssel, Overijsselse Vecht en Zwarte Water.
- Kanalen met stromend water, oude stroomgeulen en krekken in het laagveen- en kleigebied (Reitdiep, Amstel, IJ) en oude zijtakken van de Rijn die nu afgekoppeld zijn (Kromme Rijn, Hollandse IJssel) worden tot het beheertype *Zoete plas* gerekend.

### Voorbeeldgebieden

Roer.

---

## N03.01 BEEK EN BRON

### Algemene beschrijving

Het beheertype *Beek en bron* komt voor op de zand- en lössgronden van Noord-, Oost- en Zuid-Nederland en in de duinen. Het gaat om kleine stromende wateren met hun bronnen, zoals Regge, Dinkel, Berkel, Dommel, en Swalm, die uiteindelijk uitmonden in een rivier, in Oost- en Zuid-Nederland, of op een (voormalig) estuarium (Drentse Aa, Boorne in Noord-Nederland). (Mee)stromende wateren, zoals molenkolken, sprengen en opgeleide beken, behoren eveneens tot dit type. Ieder bekenstelsel kent brongebieden, bovenlopen, een of twee middenlopen en een benedenloop. Bronnen en bovenlopen liggen vaak heel verspreid en hoog in het landschap en zijn vaak gedeeltelijk ge- of vergraven. Middenlopen liggen vaak wat dieper in laagten en trekken daardoor ook veel grondwater aan. De benedenlopen liggen in vlakke veengebieden en overstromingsvlakten, ze kunnen zo breed worden dat ze lijken op kleine rivieren (Eem, Dieze, Reitdiep).

De meeste beken behoren tot de zogenaamde laaglandbeken. Daarnaast komen heuvellandbeken voor. De ecologische verschillen tussen beide typen beken zijn groot door de variatie in bodem en de verschillen tussen rustig en turbulent water. Beken in de duinen, duinrellen, hebben vaak kenmerken van beide typen.

---

Laaglandbeken zijn langzaam stromende, vaak vrij brede, beken met een regelmatige waterafvoer. Ze komen voor in vrij vlakke zandgebieden; het Drents plateau, de Achterhoek, de grote glaciale bekkens in Midden-Nederland en in grote delen van Noord-Brabant. Laaglandbeken ontsprongen vaak in hoogveen, heide of laagveen. Duidelijk herkenbare bronnen ontbreken vaak. In de laaglandbeken komen zeer rustige stukken voor, waar slib en zand afgezet wordt. Plaatselijk komt wat grover zand of fijn grind voor.

De beken in reliëfrijke gebieden, zoals Zuid- en Midden-Limburg en de stuwwallen van Midden-Nederland, hebben vaak duidelijk herkenbare bronnen, stromen sneller, slijten wat dieper in en vormen makkelijker zandbanken. De bodems zijn zandig en vaak grindrijk, slib komt slechts plaatselijk voor.

Beken en bronnen zijn van groot belang voor waterranonkels, fonteinkruiden en sterrekroossoorten, platwormen, waterkevers, libellen, waterjuffers en kokerjuffers, rivierkreeft en een groot aantal vissen: beekforel, beekprik, elrits, serpeling, kwabaal (benedenloop), rivierdonderpad, zeeprik, rivierprik, gestippelde alver en vlagzalm. De laaglandbeken met beekprik, zeeprik, gaffellibel, begroeiingen met drijvende waterweegbree, waterranonkels of teer vederkruid zijn in internationaal opzicht belangrijk.

Vrijwel alle beken zijn door de mens vergraven. Beken zijn verlengd, verbreed, verdiept, gekanaliseerd en met elkaar verbonden om water versneld af te voeren. De meeste beken zijn in de benedenloop gestuwd en lozen op kanalen en vaarten met vaste peilen. De waterkwaliteit van het beekwater is meestal niet goed door vermesting of vervuiling. Voor vissen is het ongehinderd kunnen trekken van zee naar de paaiplaatsen in beken van groot belang. Door afdamming en opstuwing is dit vaak niet goed mogelijk. Het kanaliseren en opstuwen van beken vermindert ook de overlevingskansen voor libellen, haften, kokerjuffers en platwormen.

Herstel van de waterkwaliteit is echter mogelijk en is bij de heuvellandbeken ook al succesvol. Voor de laaglandbeken is de situatie echter beduidend minder rooskleurig. Door kanalisatie en vervuiling zijn de condities van dit type beken vrijwel nergens op orde. Vooral de kleinere, zwak gebufferde en voedselarme bovenlopen en duinrellen zijn vrijwel verdwenen.

---

### Afbakening

- Het beheertype *Beek en bron* omvat bronnen en stromend water (gemiddeld meer dan 10 cm/s) met bronmos, bronkruid, beekstaartjesmos, waterranonkels, sterrekroossoorten, vederkruiden, waterviolier en enkele fonteinkruiden. De vegetaties zijn erg variabel in bedekking, ook binnen één seizoen. Omringend water en zandbanken zonder deze soorten worden ook tot het beheertype gerekend.
- Langzaam stromende riviertjes in het laagveen en kleigebied behoren tot het beheertype *Zoete plas*.

### Voorbeeldgebieden

Drentse Aa, Linde, Dinkel, dal van de Mosbeek, Beerze, Geul en Veluwe.

---

## N10.01 NAT SCHRAALLAND

### Algemene beschrijving

*Nat schraalland* is, net als *Vochtig hooiland*, zeer oud boerengrasland. *Nat schraalland* is echter minder productief en de bodem is heel slap. De graslanden zijn daarvoor slecht toegankelijk, ze kunnen 's winters onder water staan maar zullen 's zomers oppervlakkig uitdrogen. Door jaarlijks te hooien blijft het voedselarme karakter behouden. De variatie in de graslanden is groot. Blauwgraslanden en kleine zeggenvegetaties worden tot *Nat schraalland* gerekend. Hiermee in mozaiek voorkomende dotterbloemhooilanden en veldrusschraallanden worden ook tot *Nat schraalland* gerekend.

*Nat schraalland* kwam in het verleden algemeen voor in de grote veengebieden van Friesland, Holland en Utrecht. Uit oude beschrijvingen blijkt dat het ging om een combinatie van blauwgrasland met zeggenvegetaties. Deze blauw getinte graslanden kwamen voor met door pijpenstrootje, moerasstruisgras of echte witbol gedomineerde graslanden. Daarnaast komt *Nat schraalland* voor in beekdalen en op de veengronden tussen binnenduinrand en oude strandwallen. In Oost-Nederland komen bijzondere vormen voor in lage slenken van heidevelden die geleidelijk uitlopen in bovenlopen en in droge dalen op de stuwwallen. Ook in de beekdalen van het heuvelland en van Noord-Brabant komen, onder invloed van zeer basenrijk grondwater, afwijkende en bijzondere vormen voor van *Nat schraalland*. In beekdalen staat *Nat schraalland* vaak onder invloed van toestromend grondwater,

---

in de laagveengebieden gaat het echter om de combinatie van hoge grondwaterstanden, tijdelijke inundaties met gebufferd schoon oppervlaktewater of wat beter gebufferde bodems. Vaak zijn de bodems matig zuur, maar omdat *Nat schraalland* zeer gevoelig is voor verdere verzuring is de aanwezigheid van bufferstoffen, die verdere verzuring voorkomen, van essentieel belang.

De vegetatie is kruiden- en zeggenrijk en vormt overgangen naar rietland, heide of struweel. In de graslanden zijn vaak kleine verschillen in hoogte. In laagten blijft water langer staan en op overgangen naar iets drogere gronden kunnen heischrale graslanden en heiden voorkomen. Juist deze gradiënten maken het type zeer soortenrijk. *Nat schraalland* kan rijk zijn aan zegge (blonde zegge, blauwe zegge, geelgroene zegge, vlozege, tweehuisige zegge), en orchideeën (brede orchis, rietorchis, gevlekte orchis, vleeskleurige orchis, moeraswespenorchis). Karakteristieke dagvlinders zijn zilveren maan en pimpernelblauwtje. Een aantal van *Nat schraalland* afhankelijke vlinders is in ons land helaas verdwenen. In overgangen naar kalkmoeras kunnen groenknolorchis, vetblad of parnassia voorkomen.

*Nat schraalland* is door de rijkdom aan zeldzame soorten van groot Europees en nationaal belang. Blauwgraslanden zijn beperkt tot een klein gebied aan de Atlantische kust van Europa.

*Nat schraalland* komt vaak in oude, maar vaak kleine reservaten voor en zijn daarom zeer gevoelig voor ingrepen in de omgeving. Het *Nat schraalland* van de oude strandwallen en het laagveen is vrijwel verdwenen. In een aantal beekdalen is de situatie iets beter door het toestromen van grondwater. Verdroging, verzuring en vermessing zijn de belangrijke bedreigingen voor *Nat schraalland*.

### Afbakening

- *Nat schraalland* omvat blauwgrasland, kleine zeggen- en kalkmoeras. Dotterbloemhooilanden en veldrusschraallanden in beekdalen en boezemlanden kunnen ook tot dit type gerekend worden als ze in combinatie met de eerste drie vegetatietypen voorkomen.
- Komen dotterbloemhooiland en veldrusschraalland zonder blauwgrasland, kleine zeggen- of kalkmoeras voor, dan is de draagkracht van de bodem wat minder slecht en worden ze tot *Vochtig hooiland* gerekend.
- De graslanden komen voor op voedselarme, matig zure tot basische bodems die

---

gedurende de winter het waterpeil tenminste op of rond het maaiveld hebben (0-20 cm beneden maaiveld) en 's zomers slechts oppervlakkig uitdrogen. De bodems zijn vanwege het natte karakter weinig draagkrachtig.

- In *Nat schraalland* komen tenminste enkele van de volgende karakteristieke soorten voor: blonde zegge, vlozegge, sterzegge, tweehuizige zegge, knotszegge, blauwe zegge, waterdrieblad, draadrus, melkviooltje, spaanse ruiter, gevlekte orchis, moeraswespenorchis, klokjesgentiaan, welriekende nachtorchis, klein glidkruid, brede en rietorchis, vleeskleurige orchis, blauwe knoop, moerasstrepzaad, addertong, harlekijn, adderwortel, kleine valeriaan, moeraskartelblad, welriekende nachtorchis, parnassia en vetblad.
- Het beheertype wordt jaarlijks gemaaid en het maaisel wordt afgevoerd.

### Voorbeeldgebieden

Wijnjeterperschar, Ūnlan fān Jelsma, de Oude Riet, Elperstroom, Drentse Aa, Lieverense Diep, Weerribben, Wieden, Veerslootslanden, Luttenbergerven, Mosbeek, Punthuizen Stelkampsveld, De Bruuk, het Binnenveld, Meeuwen- en Allemanskamp, Laegieskamp, Abbestede, Limmer Die, Ronde Venen, Langstraat, Dommeldal, Urkhovense Zeggen en Merkse en Kathager Beemden.

---

## N10.02 VOCHTIG HOOILAND

### Algemene beschrijving

*Vochtig hooiland* is ontstaan door de ontginning van moerassen of natte bossen en door langdurig gebruik als hooiland. *Vochtig hooiland* komt voor op natte veen- en kleibodems met een redelijke draagkracht. Het gaat om bloemrijke graslanden, vaak geel van ratelaar, gewone roklaver, moerasrolklaver, geel walstro, scherpe boterbloem, kruipende boterbloem of dotterbloem. *Vochtig hooiland* is minder zeggenrijk dan *Nat schraalland*. *Vochtig hooiland* omvat dotterbloem-, Kievitsbloem- of pimperlhooilanden, weidekervelaslanden, veldrusschraallanden of de wat schralere bovenveengraslanden. Ze zijn nu niet meer interessant voor boeren door hun lage productie en eiwit-arm gewas, maar ze behoorden ooit tot de betere graslanden. *Vochtig hooiland* wordt jaarlijks tot tweemaal gehooid en daarnaast begraasd.

Net als bij natte schraallanden zijn microgradiënten in het vochtgehalte belangrijk. De hooilanden langs de rivieren bijvoorbeeld, zijn zeer gradiëntrijk met over-

---

gangen naar oeverwallen, rivierduintjes of kommen. In zeekleigebieden wordt het reliëf gevormd door de oorspronkelijke platen en krekken. In *Vochtig hooiland* komen overgangen naar grote zeggenvoetplanten en ruigten met moerasspirea voor. Lokaal kan opslag plaatsvinden van wilgenstruwelen. Deze elementen zijn van belang voor vlinders of struweelvogels. Open landschappen kunnen van belang zijn voor weidevogels. Belangrijke gebieden met *Vochtig hooiland* zijn te vinden in beekdalen, op hoge in cultuur gebrachte kwelders, langs (kleine) rivieren en in het veenweidegebied.

*Vochtig hooiland* langs de rivieren is internationaal belangrijk. Van bijzondere betekenis is wilde kievitsbloem. Een groot deel van de Europese populatie van deze soort komt in Nederland voor in de oeverlanden van het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht. *Vochtige hooilanden* zijn nationaal van belang als leefgebied van o.a. kempshaan, watersnip, zomertaling, paapje, donker pimperlauwblauwtje, rode vuurvlied, moerasprinkhaan, zomprinkhaan, harlekijn, weidekervel, trosdravik, wilde kievitsbloem, brede orchis, fijnstelige, kale, geplooid, slanke en spitslobbige vrouwenmantel, waterkruiskruid, zwartblauwe rapunzel, bosbies en adderwortel. Bovenveen graslanden zijn de laatste voorbeelden van in cultuur gebrachte hoogvenen. *Vochtige hooilanden* zijn door ontginning, ontwatering en bemesting zeldzaam geworden.

### Afbakening

- *Vochtig hooiland* omvat hooilanden (zie eerste alinea), al dan niet met nabewijding. (Zie ook *Nat schraalland* voor de afgrenzing met dit beheertype)
- *Vochtig hooiland* wordt vrijwel jaarlijks overstroomd door oppervlaktewater (o.a. langs de rivieren), of staat onder invloed van uittredend kwelwater (beekdalen), of is gelegen op een veenbodem met een gemiddeld waterpeil van 20 tot 30 cm onder het maaiveld, waarbij het peil in de zomer alleen gedurende korte tijd dieper kan wegzakken.
- Het beheertype wordt jaarlijks gemaaid en het maaisel wordt afgevoerd.
- Er wordt geen bemesting toegepast, met uitzondering van ruige stalmest (max. 20 ton per ha per jaar) of bekalking.

### Voorbeeldgebieden

Leekstermeer, Lieverense Diep, Drentse Aa, Westerwoldse Aa, Bargerveen, Tsjongerdellen, Rottige Meenthe, Meppeler Diep, Zwarte Water, Overijsselse Vecht

---

bij Zwolle, Scherenwelle, Dinkel, Springendal, Regge, Hackfort, Hagenbeek, De Nederlanden, de Bol, Waal en Burg, Ilperveld, Jipserveld, oostelijke Vechtplassen, Biesbos, Dijkwater, Zoute Haard, Dommelbeemden en De Gement en Moerputten.

---

## **N11.01 DROOG SCHRAALLAND**

### **Algemene beschrijving**

*Droog schraalland* omvat open, droge, laagproductieve, kruidenrijke, grazige vegetaties op droge lemige zandgronden, rivierduinen en op löss en kalk in het heuvelland. Het gaat zowel om stroomdalgraslanden (incl. zinkweiden) als heischrale graslanden en kalkgraslanden. Kalkgraslanden en zinkweiden zijn tot Zuid-Limburg beperkt.

Naast soortenrijke korte vegetaties zijn ook overgangen met zoomvegetaties en struwelen (met o.a. sleedoorn, rozen of jeneverbes) van belang voor de hier vaak aanwezige hoge soortenrijkdom. Dit geldt ook voor dagzomend krijtgesteente in kalkgraslanden, als bijzonder droog micromilieu met o.a. bijbehorende vetplanten.

*Droog schraalland* is afhankelijk van voldoende basenrijkdom. Meestal levert de bodem deze basen, maar via water (bijv. korte overstroming) of door sedimentatie van vers zand, kunnen ook bufferstoffen van elders aangevoerd worden. Ook mieren en mollen kunnen een rol spelen door niet uitgeloozd zand naar de oppervlakte te brengen. *Droog schraalland* is op zeer arme zandgronden vaak aanwezig langs paden of vormt vaak een overgang tussen heide en vochtig hooiland.

Op lemige zandbodems en op rivierduinen kan *Droog schraalland* op grotere oppervlakten voorkomen. In Zuid-Limburg gaat het om hellinggraslanden, waarin zowel heischrale graslanden als kalkgraslanden voorkomen. Er zijn vaak gradiënten aanwezig in basenrijkdom of vocht, die voor overgangen naar andere graslanden of heiden zorgen.

Droge schraallanden kennen meestal een lange geschiedenis van begrazing. Ze zijn van belang voor verschillende soortgroepen: vaatplanten, paddestoelen, mossen, vlinders, sprinkhanen en andere insecten.



---

Droge schraallanden zijn zeldzaam in het West-Europese laagland en zijn op Europees niveau van grote waarde, vooral de heischrale vegetaties en stroomdalgraslanden langs de grote rivieren. Zinkweiden zijn uiterst zeldzaam en beperken zich in Nederland tot een enkele locatie in het Geuldal.

Ook nationaal is *Droog schraalland* van belang, onder meer als leefgebied van: tijmblauwtje, aardbeivlinder, bruin dikkopje, bruin blauwtje, bruine vuurvlin-der, klaverblauwtje, sleedoornpage, kalkgraslanddikopje, veldparelmoervlinder, koninginpage, veldkrekkel, zoemertje, rapunzelklokje, harige ratelaar, gulden sleutelbloem, gestreepte klaver, gewone en liggende vleugeltjesbloem, geel zon-nerosje, valkruid, heidezegge, rozenkransje, gelobde maanvaren, zilverhaver, kleine pimpernel, betonie, berggamander, bevertjes, breed fakkelgras, duitse gen-tiaan, voorjaarsganzerik, voorjaarszegge, veldgentiaan, wondklaver, wilde tijm, welriekende agrimonie, zacht vetkruid, tripmadam, breukkruid, zwolse anjer, stijf hardgras, zinkboerenkers, zinkviooltje en vele orchideeën.

Door ontginning, verzuring en bemesting is *Droog schraalland* in Nederland vrijwel verdwenen en het voorkomen van de vele karakteristieke soorten is ernstig bedreigd. De belangrijkste bedreiging voor de restanten van droog schraalland is vermesting in de vorm van stikstofdepositie, waardoor de soorten van het schraal-land worden verdrongen door algemene grassen.

### Afbakening

- *Droog schraalland* omvat droge graslanden met lage open vegetaties die gedomi-neerd worden door kenmerkende soorten en vegetaties van heischraal grasland, kalkgrasland, droog stroomdalgrasland of zinkweide.
- Er vindt geen bemesting plaats.
- Droge schrale graslanden in het duingebied behoren bij het beheertype *Open duin*.

### Voorbeeldgebieden

Eexterveld, Havelterberg, Veluwe, Vreugderijkerwaard, Cortenoever, Junner en Arjener Koeland, Kunderberg, Gerendal, Gulpdal, St. Pietersberg en Bemelerberg.

---

## N14.01 RIVIER- EN BEEKBEGELEIDEND BOS

### Algemene beschrijving

*Rivier- en beekbegeleidend bos* omvat bossen welke periodiek overstroomd worden onder invloed van hoge rivier- of beekwaterstanden, zoals oibossen en beekbossen, of welke onder directe invloed staan van vrijwel permanent uittredend grondwater, zoals bronbos. Vegetatiekundig behoren deze bossen tot het Wilgenverbond, het Iepenrijke Eiken-Essenverbond en het Verbond van Els en Es. *Rivier- en beekbegeleidend bos* is op diverse bodems te vinden, zowel op rivierklei als op de meer (lemige) zandbodems langs de beken. *Rivier- en beekbegeleidend bos* is te vinden in de landschapstypen Rivierengebied (buitendijkse gronden van de grote rivieren, de Biesbosch en de Oude Maas) en Beekdalen binnen het overstromingsbereik van beken. Veel van het *Rivier- en beekbegeleidend bos* is ontstaan uit voormalige grienden in de Biesbosch en langs de grote rivieren, die hun economische betekenis hadden verloren. Recente bossen zijn vaak spontaan ontstaan uit opslag na klei- of zandwinning.

Rivier- en beekbegeleidende bossen met hun karakteristieke soorten zijn sterk achteruitgegaan in omvang en kwaliteit in Nederland. Door bedijking, verdroging, grote wijzigingen in overstromingsdynamiek en bosexploitatie is het karakter van de slechts geringe oppervlakte rivierbegeleidend bos sterk beïnvloedt. Europees gezien is rivierbegeleidend bos zo zeldzaam, dat Nederland voor de resterende oppervlakte een grote verantwoordelijkheid draagt. Bronbos is door verdroging vaak sterk verruigd of geheel verdwenen en komt in Nederland slechts op geringe oppervlakte op een beperkt aantal plaatsen voor.

Laaggelegen delen van rivierbegeleidend bos worden meestal gedomineerd door wilgen en moerasplanten. Hoger op de oever gaat een goed ontwikkeld oibos geleidelijk over in een bos met gewone es, iep en meer typische bosplanten. Struweel wordt vaak gedomineerd door wilgen of meidoorns. Door verdroging en onvoorspelbare overstromingen domineren ruigten vaak op open plekken. Bij begrazing zijn ook grazigere vegetaties aanwezig. Langs beken is doorgaans zwarte els of gewone es de dominante soort. Voedselrijkdom en basenrijkdom worden sterk bepaald door het overstromingswater. Vooral langs de rivieren en in de getijdengebieden kent het *Rivier- en beekbegeleidend bos* een voedselrijk en basisch karakter. Onder invloed van sterke kracht van overstromingen kan structuurvariatie vaak op een natuurlijke manier ontstaan.

---

*Rivier- en beekbegeleidend bos* is van belang voor diverse soortgroepen, zoals broedvogels, mede door het (vaak) weelderige en ontoegankelijke karakter. De bever is kenmerkend voor *Rivier- en beekbegeleidend bos* direct aan oevers. Door de basenrijke omstandigheden en vaak hoge luchtvochtigheid zijn deze bossen belangrijk voor veel zeldzame mossen. In het getijdebos in Nederland komen de grootste populaties van spindotterbloem en het zeer zeldzame vloedshedemos in Europa voor. Bossen langs beken kennen eveneens een rijke fauna. Bronbos kent kenmerkende soorten voor beschaduwde bronmilieu's zoals goudveil en bittere veldkers.

### Afbakening

- *Rivier- en beekbegeleidend bos* omvat bossen en struwelen die periodiek door oppervlaktewater worden overstroomd bij hoge waterstanden in beek of rivier en bossen die direct onder invloed staan van vrijwel permanent uittredend grondwater.
- *Rivier- en beekbegeleidend bos* komt niet in de duinen voor.
- Ook aangeplant populierenbos en doorgeschoten wilgengriend behoren tot dit type voor zover ze periodiek overstroomd worden.
- Bos op veengronden waar stagnerend water periodiek boven het maaiveld komt worden tot *Hoog- en laagveenbos* gerekend.

### Voorbeeldgebieden

Millingerwaard, Geul, Biesbosch, Zalkerbos, Oude Maas, Bekendelle, Lage Kavik, Hemelse Berg, Duivelsberg en Boven-Geuldal.

---

## BIJLAGE 2

### LANDSCHAPPELIJKE BEEKTYPEN

---

In de loop der tijd zijn diverse typologieën ontwikkeld om verschillende soorten beeksystemen en verwante ecosystemen te onderscheiden en te ordenen. Voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) is een typologie ontwikkeld die gericht is op hydrologie en aquatisch-ecologische kwaliteiten. De Index Natuur en Landschap (Bijlage 1) kent weer een andere indeling, waarin natuurtypen en hun beheersaspecten centraal staan. In dit handboek is gekozen voor een geomorfologische benadering van beekherstel in een landschappelijke context. Dit vraagt om een landschappelijke typologie van beeksystemen die in deze bijlage behandeld wordt. In [Tabel B2.1](#) (volgende bladzijde) wordt de relatie gelegd tussen de KRW-typologie, de Index Natuur en Landschap-typologie en de landschappelijke beektypen, zoals beschreven in deze bijlage.



#### STUWWALBEKEN

Voorkomen:	Veluwemassief en stuwwallen van Twente en Nijmegen.
Voorbeelden:	Snoeiijnsbeek ( <a href="#">Fig. B2.1</a> ); Renkumse Beek.
Zone:	erosiezone.
Morfodynamiek:	gering (verticale erosie), beekloop ligt stabiel in het landschap.
Morfologie dal:	relatief diep laat-glaciaal erosiedal (droog dal) met een smalle vlakke dalbodem uitmondend in een daluitspoelingswaaier of stuwwalglooiing. Daar waar het dal aan oude bouwlanden grenst komen steilranden voor.
Morfologie beekloop:	smalle vrij rechte beekloop op een vaste positie in het dal. De beekloop is veelal gegraven en/of opgeleid ten behoeve van de aandrijving van watermolens en ligt daardoor niet centraal in het dal, maar tegen een van de hellingen. De beekloop is vaak voorzien van een smalle houtwal als beekbegeleidende beplanting.
Voeding:	natuurlijke bron of gegraven spreng, maar ook oppervlakkige afstroming van neerslag over het maaiveld. Stuwwalbeken kunnen tijdelijk droogvallen.
Verhang:	> 1 m/km.

**Tabel  
B2.1**

**DE LANDSCHAPPELIJKE BEEKTYPEN NAAST ANDERE INDELINGEN VOOR BEKEN**

*De samenhang tussen KRW-watertypen in rivieren en beken, relevante Index Natuur en Landschap-typen en de landschappelijke beektypen in dit handboek.*

KRW WATERTYPEN RIVIEREN		INDEX NATUUR EN LANDSCHAP		
CODE	OMSCHRIJVING	N01.04	N02.01	N03.01
R1	Droogvallende bron	x		x
R2	Permanente bron	x		x
R3	Droogvallende langzaam stromende bovenloop op zand	x		x
R4	Permanent langzaam stromende bovenloop op zand	x		x
R5	Langzaam stromende middenloop/ benedenloop op zand	x	x	x
R6	Langzaam stromend riviertje op zand/klei	x	x	
R7	Langzaam stromende rivier/ nevengeul op zand/klei	x	x	
R8	Zoet getijdenwater (uitlopers rivier) op zand/klei	x	x	
R9	Langzaam stromende bovenloop op kalk	x		x
R10	Langzaam stromende middenloop/ benedenloop op kalk	x		x
R11	Langzaam stromende bovenloop op veenbodem	x		x
R12	Langzaam stromende middenloop/ benedenloop op veenbodem	x		x
R13	Snel stromende bovenloop op zand	x		x
R14	Snel stromende middenloop/ benedenloop op zand	x	x	x
R15	Snel stromend riviertje op kiezelhoudende bodem	x		x
R16	Snel stromende rivier/nevengeul op zandbodem of grind	x	x	
R17	Snel stromende bovenloop op kalkhoudende bodem	x		x
R18	Snel stromende middenloop/ benedenloop op kalkhoudende bodem	x		x

LANDSCHAPPELIJKE BEEKTYPEN

STUWWAL- BEKEN	DEKZAND- BEKEN	DEKZANDBEKEN IN HOLOCEEN KLASTISCH MATERIAAL (ZAND/ KLEI/LEEM)	DEKZANDBEKEN IN HOLOCEEN VEEN EN VEENBEKEN	TERRAS- BEKEN	HEUVELLAND- BEKEN	BEKEN IN HET RIVIEREN- GEBIED
-------------------	-------------------	---	---	------------------	----------------------	--

x				x	x	
x				x	x	
x				x		
x				x		
	x	x				
		x				x
		x				x
		x				x
					x	
					x	
x			x			
			x			x
				x	x	
				x	x	
				x	x	
				x	x	
					x	
					x	

---

Oevermateriaal:	variabel: grove hellingafzettingen; fijne hellingafzettingen met löss en/of dekzand; veen en/of moerig materiaal op plaatsen met lokale kwel.
Beddingmateriaal:	afhankelijk van de stuwwal. Veluwe: grof zand en grind; Twente: grof zand en grind, keileem of tertiaire klei. Opgeleide beken zijn in het (recente) verleden waar nodig voorzien van een leembedding om 'lekken' van de beek te voorkomen.
Opmerkingen:	in smalle diep ingesneden dalen zijn erosie en sedimentatie in evenwicht, doordat hellingmateriaal in de beek spoelt. In bredere dalen van de stuwwal kan sediment in de geul terecht komen door het instuiven van zand of door oppervlakkige afspoeling van hoge (stuif)zandduinen langs de beek. Ook door bladval kunnen stuwwalbeken (tijdelijk) verstopt raken.

---

**Fig** **VOORBEELD: DE SNOEIJINKSBEEK**  
**B2.1** *De Snoeijinksbeek, een stuwwalbeek in Twente.*





## BEKEN IN HET DEKZANDLANDSCHAP, ZONDER OF MET EEN DUNNE HOLOCENE DALVULLING

Voorkomen:	Noord-Nederland: Drents Plateau; Oost-Nederland: Twente, Salland, oostelijke Veluwezoom en Achterhoek; Midden-Nederland: Gelderse Vallei; Zuid-Nederland: Brabants dekzandlandschap.
Voorbeelden:	Puntbeek ( <a href="#">Fig. B2.2</a> ); Keersop; Barneveldse Beek.
Zones:	erosiezone en transportzone.
Morfodynamiek:	gering-matig.
Morfologie van het dal:	ondiep laat-glaciaal dal, begrensd door dekzandruggen. Beekloop volgt de morfologie van het oorspronkelijke dal. De dalvlakte is vlak of licht hellend in de richting van de beekloop. Daar waar het dal aan oude bouwlanden grenst komen steilranden voor.
Morfologie beekloop:	rechte tot slingerende beekloop in het centrale deel van de dalvlakte. In de geul kunnen tijdens hoge afvoeren lokaal plaatsvaste banken ontstaan, die bij lagere afvoeren weer worden geërodeerd. Ook op de flank van de geul kan periodiek een laagje zand worden afgezet.
Voeding:	bovenlopen van stuwwalbeken, bronnen en kwelzones met grondwater en neerslag via oppervlakkige afspoeling en het (natuurlijk) drainagesysteem van geultjes/greppels.
Verhang:	<1 m/km.
Oevermateriaal:	(matig) fijne dekzanden en/of fluvioperiglaciaal zanden met een humeuze tot venige bovengrond soms aangerijkt met een dunne leem-, kleilaag als gevolg van inundatie van de beek tijdens hoge afvoeren. Lokaal kan het oevermateriaal uit veen bestaan. In kwelgebieden komen verkitte ijzerlagen en ijzeroerbanken voor.
Beddingmateriaal:	(matig) fijne dekzanden tot matig grove fluvioperiglaciaal zanden waarin lokaal (kei)leembanken of ijzeroerbanken voorkomen.



---

**Fig**      **VOORBEELD: DE PUNTBEEK**

**B2.2**      *De Puntbeek, een beek in het Twentse dekzandlandschap zonder holocene dalvulling.*



**BEKEN IN HET DEKZANDLANDSCHAP, MET HOLOCENE KLASTISCHE (ZAND/LEEM/ KLEI) DALVULLING**

**Voorkomen:**                      Oost-Nederland: Twente, Salland, Achterhoek; Zuid-Nederland: Brabants dekzandlandschap.

**Voorbeelden:**                     Dinkel ([Fig. B2.3](#)); Dommel.

**Zones:**                                transportzone en sedimentatiezone.

**Morfodynamiek:**                 matig-hoog.

**Morfologie van het dal:** laat-glaciaal dal, met een holocene dalvulling van zand, leem of klei, begrensd door dekzandruggen. De beekloop wordt geflankeerd door oeverwallen, en de 'dalvlakte' is reliëfrijk: naast restgeulen van de beek, die in verschillende stadia van verlanding verkeren, komen er geïsoleerde laagten (kommen) en ruggen voor. Aan de binnenzijde van meanderbochten liggen kronkelwaarden en aan de buitenzijde, waar de beek de dalrand ondergraaft, liggen

---

	steiloevers. Ook waar het dal aan oude bouwlanden grenst komen steilranden voor. Door de vorming van een stroomrug met oeverwallen helt de dalvlakte van de beek af in de richting van de dalflank.
Morfologie beekloop:	slingerende of (actief) meanderende beekloop die door de dalvlakte migreert. De beek varieert in breedte en de oevers zijn steil in de buitenbocht en op de rechte delen en flauw in de binnenbocht. Tijdens hoge afvoeren komen in de geul in de brede trajecten en binnenbochten zandbanken tot ontwikkeling.
Voeding:	aanvoer vanuit de bovenloop van het beekstelsel en lokale kwelzones in het beekdal.
Verhang:	<1 m/km.

---

**Fig**      **VOORBEELD: DE DINKEL**

**B2.3**      *De Dinkel, een beek in het dekzandlandschap met een holocene klastische dalvulling. In de binnenbocht van de beek is een plaatsvaste zandbank afgezet.*



Oevermateriaal:	(matig) fijne zandige beekafzetting met een dunne leem- of kleilaag als gevolg van inundatie van de beek tijdens hoge afvoeren; lokaal veen en/of moerige beekafzettingen in restgeulen. In kwelgebieden komen verkitten ijzerlagen en ijzeroerbanken voor. In de flanken van het beekdal komen (matig) fijne dekzanden en matig grove fluvioperiglaciaale zanden voor met lokaal (kei)leembanken of ijzeroerbanken.
Beddingmateriaal:	(matig) fijne zandige beekafzettingen, waarin lokaal beekleembanken of ijzeroerbanken voorkomen.



### **BEKEN IN HET DEKZANDLANDSCHAP, MET HOLOCENE VENIGE DALVULLING, EN BEKEN IN HET VEENLANDSCHAP**

Voorkomen:	Noord-Nederland: Drents Plateau en Hunzevallei; Oost-Nederland: Twente en Achterhoek; Zuid-Nederland: in de Centrale Slenk in Brabant.
Voorbeeld:	Drentsche Aa ( <a href="#">Fig. B2.4</a> ).
Zones:	transportzone en sedimentatiezone.
Morfodynamiek:	gering.
Morfologie van het dal:	laat-glaciaal dal, opgevuld met Holoceen veen, of een veenvlakte. De dalvlakte of veenvlakte wordt begrensd door dekzandruggen of oudere pleistocene terreinvormen. De beekloop kan lokaal worden geflankeerd door een smalle lage oeverwal. De dalvlakte is vlak, licht komvormig of (licht) hellend in de richting van de beek. Deze laatste vorm treedt op als de beek het veen in het dal draineert. Daar waar het dal aan oude bouwlanden grenst komen steilranden voor. In alle andere gevallen is er vaak sprake van een meer geleidelijke overgang waarbij het veen uitwigt over de pleistocene ondergrond. In het dal kunnen pleistocene opduikingen voorkomen.
Morfologie beekloop:	rechte tot sterk slingerende beekloop die plaatsvast in het beekdal ligt. De beek is vrij uniform van breedte en de oevers zijn zowel in de rechte delen als in de bochten steil.
Voeding:	aanvoer vanuit de bovenloop van het beekstelsel en van

---

Verhang:	uit kwelzones in de flanken van het beekdal. <1 m/km.
Oevermateriaal:	veen of zandig veen. Het veen bestaat veelal uit broekveen (bosveen) en/of zeggeveen. In het broekveen kunnen grote boomlijken voorkomen. Het zandige veen beperkt zich tot een smalle zone langs de beek.
Beddingmateriaal:	de bedding van de beek bestaat uit veen, (matig) fijn zand en fijn organisch materiaal.

---

**Fig**      **VOORBEELD: DE DRENTSCHE AA**

**B2.4**      *De Drentsche Aa, een beek in het dekzandlandschap met venige holocene dalvulling. De oevers van de beek zijn vrij steil.*





## TERRASBEKEN

Voorkomen:	Oost-Nederland: Achterhoek (Winterswijk); Zuid-Nederland: Peelhorst, Kempisch Terras en Maasterrassen.
Voorbeelden:	Roer; Swalm; Berwijn (in België; <a href="#">Fig. B2.5</a> ).
Zones:	erosiezone (en transportzone).
Morfodynamiek:	matig-hoog.
Morfologie van het dal:	matig tot diep ingesneden dal met aan weerszijden (hoge) steilranden. Dalinsnijding neemt toe nabij de overgang naar een lager gelegen terras. Dalvlakte heeft het reliëf behorend bij een actief meanderende beek, met meander-ruggen en -geulen en restlaagten. Door het erosieve karakter van de beek en de beperkte ruimte in het dal ontbreken meestal de oeverwallen.

### Fig VOORBEELD: DE BERWIJN

**B2.5** *De Berwijn, een meanderende terrasbeek in het Belgische Maasdal met een steiloever in de buitenbocht en kronkelwaardreliëf in de binnenbocht.*



---

Morfologie beekloop:	(sterk) meanderende beekloop die binnen de dalvlakte migreert. De beek is relatief ondiep en varieert sterk in breedte en diepte, zowel in de lengterichting als in het dwarsprofiel. De steiloever van het terras wordt actief ondergraven waar de beek de terrasrand raakt. Bij diepe insnijding in het terras wordt het proces van meanderen onderdrukt en manifesteert de morfodynamiek zich door bankvorming in een rechte tot slingerende beekloop.
Voeding:	aanvoer vanuit de bovenloop van het beekstelsel.
Verhang:	>1 m/km.
Oevermateriaal:	(matig) grof zand en grind. Lokaal kunnen klei- en leemlagen voorkomen. Restlaagten en -geulen kunnen zijn opgevuld met beekafzettingen, moerig materiaal en veen.
Beddingmateriaal:	(matig) grof zand en grind. Lokaal kunnen klei- en leemlagen voorkomen.

---



## HEUVELLANDBEKEN

Voorkomen:	Zuid-Limburg.
Voorbeeld:	Geul ( <a href="#">Fig. B2.6</a> ).
Zones:	erosiezone en transportzone.
Morfodynamiek:	matig-hoog.
Morfologie van het dal:	diep (>100m) ingesneden asymmetrisch dal in pre-tertiaire, tertiaire en kwartaire gesteenten en afzettingen. Het proces van insnijding is al actief vanaf het begin van het Kwartair als reactie op de opheffing van Ardennenmassief. De hellingen zijn bedekt met löss, en variëren van zeer kort en steil tot lang en flauw. Oudere afzettingen en gesteenten dagzomen in steilwanden in de dalflank. De dalvlakte bestaat uit een vlak deel langs de beek en waar zijdalen in het beekdal uitmonden liggen daluitspoelingswaaiers. De beekloop ligt asymmetrisch in het dal; haar positie wordt bepaald door de ligging van de daluitspoelingswaaiers. De beek is niet geneigd tot het vormen van oeverwallen, omdat voornamelijk fijn materiaal (löss) wordt getransporteerd. Wanneer de beek buiten haar oe-

---

	<p>vers treedt en het dal inundeert wordt het fijne sediment verspreid over de vlakke afgezet. Het grove zand en grind blijven in de geul.</p>
Morfologie beekloop:	<p>sterk meanderende beekloop met korte scherpe meanderbochten met een geringe amplitude die door het vlakke deel van het dal stroomafwaarts migreren. De beekloop, varieert sterk in breedte en diepte, zowel in de lengterichting als in het dwarsprofiel. De erosieve oever is altijd steil; in smalle beektrajecten zijn beide oevers steil. Waar de beek meandert liggen in binnenbochten grofzandige banken ('point bars') en waar de bedding zich verbreedt komen grindbanken voor. Door de hoge morfodynamiek raken bomen en struiken op de oever ontworteld en vallen in de beek. De morfologie van de geul wordt op haar beurt weer sterk beïnvloed door wortelkluiten en stammen. Kronkelwaarden treffen we aan in scherpe binnenbochten, maar door de sterke stroomafwaarts gerichte migratie van de bedding worden deze ook stelselmatig weer opgeruimd. Heuvellandbeken zijn in het verleden veelvuldig gebruikt voor de aandrijving van watermolens. Ten behoeve daarvan zijn beken omgeleid en zijn molenkolken aangelegd.</p>
Voeding:	<p>uit bronnen aan de randen van de plateaus in de bovenloop van het beekstelsel en door de toestroom van water vanuit de talloze kleine zijbeken die vanaf de plateaus en terrassen in diep ingesneden dalen uitmonden in het centrale beekdal. Ook wordt de beek gevoed door oppervlakkige afstroming van regenwater vanaf de hellingen. Naast water kunnen tijdens hevige buien ook grote hoeveelheden verspoelde löss van de hellingen in het beekstelsel terecht komen.</p>
Verhang:	<p>&gt;1 m/km.</p>
Oevermateriaal:	<p>dalopvulling bestaande uit van de hellingen afgespoelde löss (colluvium), vermengd met terras-zanden en -grinden, kalksteenresten en vuurstenen. Het bodemmateriaal heeft een textuur van lichte zavel tot lichte klei en kan</p>

---

zowel kalkhoudend als kalkloos zijn. Colluviale afzettingen bevatten relatief veel organische stof afkomstig van de bovengrond van de hellingen.

Beddingmateriaal: (matig) grof zand en grind. Lokaal kunnen resistente klei- of (löss)leemlagen voorkomen.

---

**Fig**

**B2.6**

**VOORBEELD: DE GEUL**

*De Geul, een actief meanderende beekloop in het heuvelland met een steiloever in colluviale löss. Door oevererosie komen hele wortelkluiten in de beek terecht.*







## BEKEN IN HET RIVIERENGEBIED

Voorkomen:	Ijsseldal, Maasdal en langs de Nederrijn.
Zones:	transportzone en sedimentatiezone.
Voorbeelden:	Benedenloop van de Swalm (Fig. B2.7); Leuvenheimse beek.
Morfodynamiek:	laag (periodiek hoog onder invloed van rivierdynamiek).
Morfologie van het dal:	beken in het rivierengebied zijn altijd de benedenlopen van heuvellandbeken, terrasbeken, stuwwalbeken of beken uit het dekzandlandschap. De meeste beeklopen in het rivierengebied volgen de natuurlijke morfologie van restgeulen of kronkelwaardgeulen in de riviervlakte voordat ze uitmonden in de rivier.
Morfologie beekloop:	rechte tot slingerende loop met steile oevers. Er is meestal weinig morfodynamiek door het geringe dalverhang van de rivier en de consistentie van de oevers (zavel, klei en/of veen). In het mondingsgebied van de beek is de (morfo)dynamiek vaak wat hoger door de wisselende waterstanden van de rivier. Bij hoge afvoeren kan de morfodynamiek periodiek verhoogd zijn. Onder invloed van erosie- en sedimentatieprocessen kan de morfologie van de beekloop lokaal sterk aan verandering onderhevig zijn.
Voeding:	uit het bovenstrooms gelegen deel van de beek, eventueel aangevuld door kwel in restgeulen en langs de terrasranden.
Verhang:	<1 m/km.
Oevermateriaal:	de geulvulling van restgeulen waarin beken door het rivierengebied lopen is variabel. Langs de Rijntakken zijn restgeulen en kronkelwaardgeulen veelal opgevuld met gelaagde afzettingen van klei, zavel en zand en verspoeld organisch materiaal. Langs de Maas komen kwelgeulen voor die opgevuld zijn met veen, maar ook restgeulen met een vulling van lichte zavel of zand.
Beddingmateriaal:	variabel, afhankelijk van de vulling van de restgeul.
Opmerking:	alleen langs de Maas komen beken in het rivierengebied voor die vrij afstromen naar de rivier.

---

**Fig**      **VOORBEELD: DE SWALM**

**B2.7**      *De Swalm in het Maasdal, een slingerende beekloop in een oude restgeul van de Maas. Links op de voorgrond is de voet van een door bevers doorgeknaagde boom zichtbaar.*



---

## COLOFON

---

Amersfoort, mei 2015

### **Uitgave**

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

Postbus 2180

3800 CD Amersfoort

### **Auteurs**

Bart Makaske (Alterra) en Gilbert Maas (Alterra)

### **Begeleidingscommissie:**

Wim Zeeman (Dienst Landelijk Gebied, voorzitter CoP Hermeandering), Marja Kits (Waterschap Aa en Maas), Romeo Neuteboom Spijker (Waterschap Vallei en Veluwe), Corine Geujen (Natuurmonumenten) en Michelle Talsma (STOWA)

### **Opdrachtgever**

Ministerie van Economische Zaken en STOWA

### **Fotografie**

Grote foto's: Istockphoto

**Vormgeving** Shapeshifter, Utrecht

**Druk** Libertas, Utrecht

**STOWA-rapportnummer** 2015-02

**ISBN** 978.90.5773.661.2

Op stowa.nl kunt u een exemplaar van dit rapport bestellen of een pdf van het rapport downloaden.

Kijk onder de kop [Producten](#) | [Publicaties](#).

---

---

### De CoP Hermeandering Beken

De Community of Practice (CoP) Hermeandering Beken - gestart in 2007 - is een platform waarin waterschappers en wetenschappers kennis en ervaringen uitwisselen over morfodynamische (of hydromorfologische) processen in vrij stromende beken. Het gaat met name over hermeandering van beken en de wijze waarop beken met het oog daarop moeten worden heringericht, beheerd en onderhouden. Voor verslagen van bijeenkomsten van deze CoP, alsook voor publicaties en nieuwsberichten over hermeandering kunt u terecht op de STOWA-themasite over beek- en rivierherstel.

### Copyright

Teksten uit dit rapport mogen worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor rapporten 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 tijde 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 FAX 033 460 32 01  
Stationsplein 89 3818 LE AMERSFOORT  
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

