

MORFODYNAMIEK VAN NEDERLANDSE LAAGLANDBEKEN

2014
15



stowa

MORFODYNAMIEK VAN NEDERLANDSE LAAGLANDBEKEN

COLOFON

Amersfoort, mei 2014

Uitgave

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

Opdrachtgever

Michelle Talsma, STOWA

Auteurs

Joris Eekhout en Ton Hoitink (Wageningen Universiteit)

Begeleidingscommissie/redactie

Piet Verdonschot (Alterra), Michelle Talsma (STOWA), Wim Zeeman (DLG), Mirja Kits (Waterschap Aa en Maas), Bart Makaske (Alterra), Harry Huijskes (DLG), Corine Geijnen (Natuurmonumenten), Romeo Neuteboom Spijker (Waterschap Vallei en Veluwe), Hil Kuypers (DLG)

Onderzoekers

Remko Uijlenhoet (Wageningen Universiteit), Philip Wenting (Wageningen Universiteit), Jan de Brouwer (Alterra), Anne Besse-Lototskaya (Alterra), Dorine Dekkers (Alterra), Rob Fraaije (Universiteit Utrecht), Merel Soons (Universiteit Utrecht), Erik Mosselman (Deltares), Andrés Bargas-Luna (TU Delft)

Studenten Wageningen Universiteit

Iris van Erp, Wieneke Huijben, Tjitske Geertsema, Marjan Sommeijer, Serge Versluis

Project Beekdalbreed hermeanderen

Pui Mee Chan (STOWA), Marieke de Lange (Alterra), Joost Rooijakkers (Waterschap Aa en Maas), Ineke Barten (Waterschap De Dommel), Peter-Paul Schollemans (Waterschap Hunze en Aas), Frans Verdonschot (Waterschap Peel en Maasvallei), Inge Janssen (Waterschap Peel en Maasvallei), Rob Gerritsen (Waterschap Vallei en Veluwe), Peter van Beers (Waterschap Vallei en Veluwe), Rudy ten Tusscher (Waterschap Vallei en Veluwe), Christiaan Husing (Waterschap Vallei en Veluwe), Rob van den Braak (Waterschap Vallei en Veluwe), Bas Worm (Waterschap Vechtstromen), Piet-Jelle Damsté (Waterschap Vechtstromen)

.....
.....
.....
Vormgeving Shapeshifter, Utrecht

Fotografie Joris Eekhout en Thinkstock

Druk Libertas, Utrecht

STOWA-rapportnummer 2014-15

ISBN 978.90.5773.631.5

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

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

Copyright

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

Disclaimer

Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen 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 IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

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

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

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

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en hetzelfde 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
- i. www.stowa.nl

INHOUDSOPGAVE



STOWA in het kort	04
Ten geleide	08
1 INLEIDING	10
2 VELDLOKATIES	20
3 ONTWIKKELING BOVENAANZICHT	32
4 LENGTEPROFIEL	42
5 OEVEREROSIE	52
6 KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK	62
7 CONCLUSIES	72
8 AANBEVELINGEN VOOR DE PRAKTIJK	76
Referenties	80
Bijlage A: Afvoertijdseries	87
Bijlage B: Historische kaarten	89

TEN GELEIDE



In de eerste helft van de 20ste eeuw zijn veel laaglandbeken in Nederland gекanaliseerd. Dit heeft vaak geleid tot grote veranderingen in de hydrologie en morfologie van beken, met als gevolg een sterke achteruitgang van de bijbehorende karakteristieke aquatische en terrestrische ecosystemen. In de afgelopen 25 jaar zijn de Nederlandse waterschappen begonnen met beekherstel om wateroverlast te voorkomen, verdroging terug te dringen (Waterbeheer 21^e eeuw) en de ecologische (water)kwaliteit van beeksystemen te verbeteren (KRW). Eén van de meest toegepaste maatregelen hierbij is hermeandering.

Om meer inzicht te krijgen in de morfologie van beken is een vierjarig wetenschappelijk promotieonderzoek uitgevoerd, gefinancierd door STOWA. Het onderzoek heeft geresulteerd in een proefschrift met als titel 'Morphological processes in low land streams' (Eekhout 2014). Het doel was met name het in kaart brengen van de morfodynamiek van Nederlandse laaglandbeken, toegepast in de vigerende beekherstelpraktijk. Morfodynamiek focust zich op de ruimtelijke veranderingen van structuren, waaronder oevers en bodems.

Uit het onderzoek komt naar voren dat laaglandbeken in Nederland over het algemeen weinig morfodynamiek kennen. Toch komen incidenteel substantiële morfologische veranderingen voor, maar deze zijn lokaal van karakter en vinden veelal plaats in het eerste jaar na aanleg. De veranderingen zijn vooral toe te schrijven aan externe factoren, bijvoorbeeld erosiegevoelheid van de oevers en aanpassing van het lengteprofiel door stuweffecten. In die periode zal dan ook intensievere monitoring moeten plaatsvinden.

In de daaropvolgende periode lijkt de beek zich te stabiliseren en voltrekken morfologische veranderingen zich langzaam. Uit dit onderzoek komt ook naar voren dat de laaglandbeken een hoge dynamiek in de afvoer kennen, wat mogelijk een nadelige invloed op het herstel van het ecosysteem heeft. Herstel van de hydrologie vraagt om nader onderzoek.

Samenvattend blijkt uit het onderzoek dat laaglandbeken weinig morfologische dynamiek kennen en het aangelegde beekprofiel vrij stabiel is. Het beekontwerp wordt daarmee van groot belang. Het onderzoek geeft hiervoor vanuit de morfologie belangrijke aandachtspunten.

JOOST BUNSTMA

Directeur STOWA

H1 INLEIDING

A photograph of a winter scene. In the foreground, a dark body of water reflects the surrounding environment. On the right bank, a large tree trunk is almost entirely buried in the snow, with its branches reaching upwards. To the left, another tree stands with its bare branches covered in snow. The background is filled with more snow-covered trees and a hazy sky, suggesting a cold, overcast day.

Inleiding

Laaglandbeken zijn in heel Oost- en Zuid-Nederland te vinden, daarnaast komen ze ook voor op de overgang naar Laag Nederland en langs de binnenduinrand. Higler *et al.* (1995) komen tot een schatting van 17000 km beeklengte in Nederland. Bijna een derde hiervan zal tot 2027 hersteld worden. Versnipperd over Nederland komen natuurlijke beekdalrestanten voor. De isolatie van deze beekdalrestanten wordt versterkt door de slechte milieuomstandigheden (lichtinval, eutrofierung, stromingsbeperkingen) in veel tussenliggende beektrajecten en door het ontbreken van longitudinale connectiviteit door de aanwezige stuwen, duikers en sifons. Beekplanten en -dieren gedijen optimaal onder koele (beschaduwde), matig voedselrijke omstandigheden, een redelijk constante waterstroming en een rijkdom aan structuren zoals takken, bladpakketten en planten. Veranderingen in waterkwantiteit, waterkwaliteit en morfologie vormen de knelpunten in de huidige laaglandbeeksystemen.

Historische ontwikkeling morfologie van laaglandbeken

Laaglandbeken hebben sinds de laatste IJstijd (12 duizend jaar geleden) het Nederlandse zandlandschap vormgegeven. Het smeltende water heeft erosiegeulen doen ontstaan die later in sommige gebieden met veen zijn opgevuld. Door het ontstaan van een kleinschalig reliëf met variatie in bodemopbouw en waterhuishouding, ontstonden graduele overgangen tussen hoog en laag, droog en nat en voedselarm en voedselrijk. Deze overgangen zijn de basis voor de zeer hoge biodiversiteit van het natuurlijke beekdallandschap en de beken zelf. Naar schatting komt 75% van de Nederlandse biodiversiteit in beken en beekdalen voor en deze biodiversiteit is daar veelal ook direct van afhankelijk.

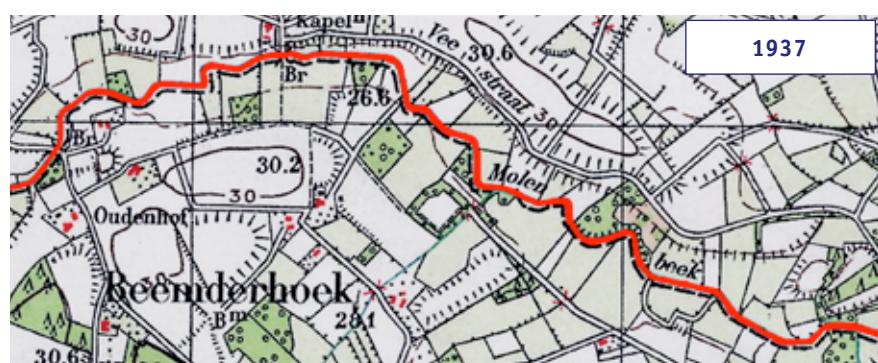
Uit historisch onderzoek is gebleken dat in de 18^{de} en 19^{de} eeuw laaglandbeken zijn gebruikt om agrarische gronden te bevloeien (Baaijens & Dauvellier, 2011). Agrariërs hebben in deze periode doelbewust inundatie van hun agrarische gronden bevorderd. Het nutriëntrijke beekwater werd voor langere tijd op de gronden gelaten, zodat nutriënten konden bezinken. Baaijens & Dauvellier (2011) suggereren dat in deze periode (delen van) beken zijn aangelegd/vergraven, om bevloeiing op grote schaal toe te passen. Deze bevloeiingssystemen werden overbodig na de introductie van kunstmest in het begin van de 20^{ste} eeuw.

In de periode na de introductie van kunstmest ging het roer om. Het water moest

Fig 1

TUNGELROYSE BEEK

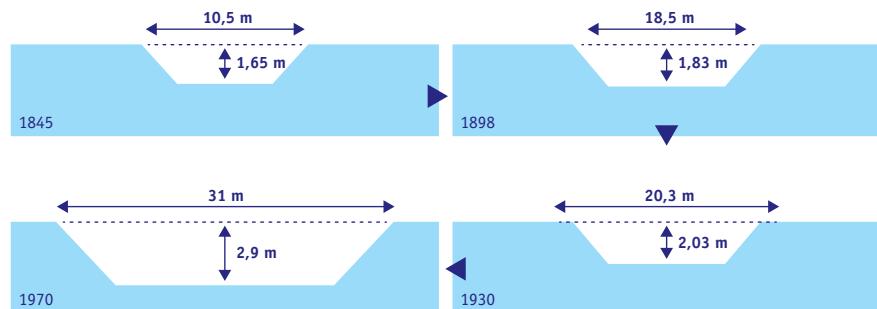
Drie historische kaarten die het verloop van kronkelend naar kanalisatie laten zien in de Tungelroyse beek (bron: website watwaswaar.nl).



juist zo snel mogelijk van de landbouwpercelen af. Halverwege de vorige eeuw is begonnen met grootschalige kanalisatie en normalisatie van de Nederlandse laaglandbekken ([Figuur 1](#)). Dit had tot gevolg dat een groot deel van de beken is rechtgetrokken. Hierna is enkele malen het dwarsprofiel van de beken verdiept en verbreed, om meer en sneller water af te kunnen voeren tijdens natte perioden. Er is berekend dat in Nederland, maar ook in het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Denemarken meer dan 90% van de beken op deze manier zijn aangepast (Brookes & Long, 1990; Iversen *et al.*, 1993; Verdonschot & Nijboer, 2002; Lorenz *et al.*, 2004).

Fig 2

HET TOENEMEN VAN DE DIMENSIES IN DE BERKEL BOVENSTROOMS VAN LOCHEM (naar De Jong, 1982).



[Figuur 2](#) laat een voorbeeld zien hoe het dwarsprofiel van de Berkel van 1845 tot 1970 is aangepast. Ook zijn stuwen gebouwd om de (grond-)waterstand te kunnen reguleren. Tijdens droge periodes werd het water vastgehouden, om te voorkomen dat de beken droogvielen. Tijdens natte periodes gingen de stuwen open, om het water zo snel mogelijk af te voeren. Daarnaast zijn in de periode van kanalisatie/normalisatie op grote schaal sloten aangelegd. De sloten hadden ook als doel om inundatie van landbouwgronden te voorkomen en het water zo snel mogelijk richting de beken te leiden. Later werden meerdere beken in de zomer gebruikt als wateraanvoersysteem. Bovenstrooms werden deze beken aangetakt op kanalensystemen met als doel water te transporteren naar droge gebieden. Deze maatregelen hadden serieuze gevolgen voor de hydrologische condities op stroomgebiedschaal (Meijles & Williams, 2012). Het heeft gevlogen gehad voor het afvoerpatroon van de Nederlandse laag-

landbekken, dat nu veelal een “flashy” afvoerregime kent. Vergelijkbare maatregelen zijn ook op grote schaal geïmplementeerd in laaglandbekken in Duitsland (Lorenz, *et al.*, 2009), Japan (Nakano, *et al.*, 2008), Zweden (Osborne, *et al.*, 1993), Groot-Brittannië (Vivash, *et al.*, 1998) en Denemarken (Brookes, 1987; Iversen *et al.*, 1993).

Door deze morfologische aanpassingen, in combinatie met intensief onderhoud, is de variatie aan structuren in de laaglandbekken grotendeels verloren gegaan (Verdonschot & Nijboer, 2002). Verdonschot, *et al.* (1995) concludeerden dat de getroffen maatregelen (kanalisatie, normalisatie en regulatie) dramatische gevolgen hadden voor de stroomsnelheden, één van de belangrijkste parameters voor de abiotische omstandigheden van de micro-organismen. Gedurende lage afvoeren werden stuwen gesloten om te voldoen aan de grondwaterbehoefte van aanpalende landbouwgronden. Hierdoor werd de stroomsnelheid nihil en zijn de beekbodem veelal verslibt. Tijdens perioden met hoge afvoeren werden stuwen gestreken. Dit heeft tijdens piekafvoeren tot dusdanig hoge afvoeren geleid, dat het bodemleven veelal werd weggespoeld tijdens dit soort afvoerpieken. Uiteindelijk heeft dit geleid tot het verdwijnen van zuurstofhankelijke dieren en beekplanten. Het typische heterogene habitatpatroon is verdwenen en heeft plaatsgemaakt voor een homogeen patroon, dat voornamelijk bestaat uit zand of slib.

Beekherstel

De meerderheid (96%) van de Nederlandse laaglandbekken zijn sterk beïnvloed door menselijk handelen (Verdonschot & Nijboer, 2002). Hieruit valt op te maken dat er een grote noodzaak is voor beekherstel in Nederland. In de jaren zeventig zijn de eerste voorzichtige stappen genomen voor het herstellen van de gekanaliseerde laaglandbekken. In deze periode is begonnen met het aanplanten van houtwallen, die als doel hadden de voedseltoevoer (blad) naar de beek te herstellen, de beekwatertemperatuur te verlagen, het zuurstofgehalte te verhogen en waterplantengroei te verminderen. Vervolgens zijn in de jaren negentig de eerste hermeanderingsprojecten uitgevoerd. Met hermeandering wordt het aanleggen van een kronkelende waterloop bedoeld, vaak overeenkomstig met de historische situatie (bv. [Figuur 1](#)). Het proces van beekherstel kwam in een stroomversnelling na de introductie van de Kaderrichtlijn Water (KRW; Council of the European Communities, 2000). De KRW stelt dat ieder waterlichaam vanaf 2015 moet voldoen aan een goede ecologische toestand, waarbij de mogelijkheid bestaat om uitstel aan te vragen tot 2027. Tot 2008 was in Nederland in totaal 663 km beek herstelt (Didderen *et al.*, 2009).

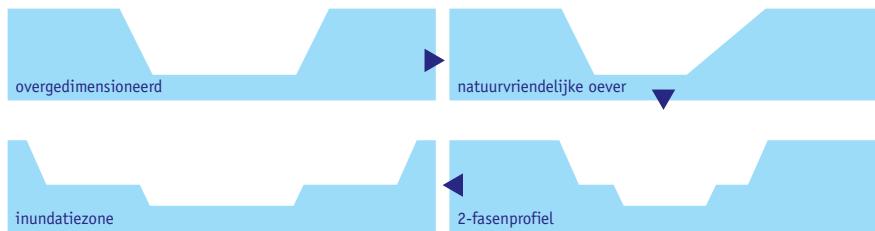
Om een goede ecologische toestand te bereiken wordt een aantal maatregelen uitgevoerd, zoals het hergraven van de beekloop (hermeandering) en het verwijderen van stuwen. Hermeandering en herprofieleren zijn de meest populaire maatregelen (Didderen *et al.*, 2009). Naast het aanleggen van een nieuwe kronkelende beekloop worden dwarsprofielen versmald en verondiept. De dimensies van het dwarsprofiel volgen vaak uit modelberekeningen (bv. SOBEK; Deltares, 2011). Wanneer de beek in landbouwgebied ligt, wordt geprobeerd om de huidige hydrologische toestand te handhaven. Praktisch vertaalt zich dat naar het handhaven van het grondwaterbeleid voor aanpalende landbouwgronden en het voorkomen van overstromingen in natte perioden. Deze randvoorwaarden gelden niet wanneer er meer ruimte is en vernatting van omliggend gebied geen probleem is. Daarnaast wordt geprobeerd om te voldoen aan ecologische eisen: geen droogval en het hele jaar voldoende stroming. Uit een grootschalige beekherstelenquête is gebleken dat verbetering van de fysisch-chemische waterkwaliteit, verbetering van de stromingscondities, verbetering van de morfologie en verbetering van de leefomstandigheden van bepaalde soorten of soortgroepen de belangrijkste beoogde effecten zijn in het huidige beekherstel (Didderen *et al.*, 2009).

De vorm van het dwarsprofiel is in de afgelopen 25 jaar sterk geëvolueerd ([FIGUUR 3](#)). Bij de eerste hermeanderingsprojecten werd een nieuwe beekloop aan het maaiveld gegraven. Om te kunnen voldoen aan de hydrologische eisen resulteerde dit vaak in overgedimensioneerde dwarsprofielen. In deze periode werden de gevolgen voor droogteschade als gevolg van een overgedimensioneerd profiel nog niet onderkend. Vervolgens zijn natuurvriendelijke oevers en 2-fasenprofielen geïntroduceerd. Natuurvriendelijke oevers waren flauwe oevers, met als doel een gradiënt in de oevervegetatie te ontwikkelen. Het 2-fasenprofiel had een meer hydrologische insteek, waarbij een smalle zone naast het zomerbed werd gegraven om tijdens hoge afvoeren voldoende afvoercapaciteit te hebben, maar ook om ruimte te maken voor terrestrische ecologie.

Tegenwoordig worden bijna alle projecten voorzien van een breed winterbed, ofwel een inundatiezone. Dit is een gevolg van Nederlands waterbeleid op basis van het credo: vasthouden, bergen, afvoeren (WB21; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Water moet tijdens natte perioden in het beekdal vastgehouden worden, om vervolgens gelijkmatig het water af te voeren. Daarnaast geeft dit nog meer ruimte voor de ontwikkeling van beekbegeleidende vegetatie.

Fig 3

DE EVOLUTIE VAN HET DWARS profiel BIJ BEEKHERSTEL



Laaglandbekken

Hierboven is gerefereerd aan het woord laaglandbeek om het type waterlichaam te benoemen waar dit rapport over gaat. De KRW onderscheidt waterlichamen als de kleinste operationele eenheid in een natuurlijk watersysteem. Een waterlichaam behoort tot een bepaald KRW-type en een KRW-type behoort weer tot een categorie. Er worden 4 categorieën wateren onderscheiden, namelijk meren, rivieren, overgangswateren en kustwateren. Nederlandse beken behoren tot de categorie rivieren (van der Molen *et al.*, 2012).

In totaal worden 8 KRW-typen onderscheiden waar Nederlandse beken onder vallen (Elbersen, *et al.*, 2003). [Tabel 1](#) laat zien welke KRW-typen er in Nederland voorkomen, met hun kenmerken en de totale beeklengte die in Nederland voorkomt. De totale beeklengte wijkt af van de eerder genoemde totale beeklengte in Nederland, aangezien in de tabel alleen de beken zijn ondergebracht die als KRW-waterlichaam zijn geklassificeerd. Door de geringe dimensies vallen kleine bovenloopjes buiten deze tabel. De tabel laat zien dat 92% van de totale beeklengte tot 3 KRW-typen behoort, namelijk R4, R5 en R6: langzaam stromende beken op zand. In dit rapport ligt de focus daarom op dit type beken. In het vervolg zal hieraan de benaming laaglandbeek worden gegeven.

De morfologische ontwikkeling van laaglandbekken is niet vaak onderwerp geweest van wetenschappelijke studies. De meest uitgebreide studie is verricht door Wolfert (2001), die over een periode van twee jaar drie beekherstelprojecten heeft gemonitord. Eén van de belangrijkste conclusies was dat de meeste morfodynamiek optrad tijdens de eerste piekafvoeren na aanleg. Dit uitte zich onder andere in oevererosie

en de vorming van kuilen op de beekbodem. Na deze initiële aanpassing raakten de toe- en afvoer van sediment meer in balans en bleven substantiële morfologische veranderingen uit. Vergelijkbare observaties zijn gedaan in laaglandbekken in Engeland (Sear *et al.*, 1998) en de Verenigde Staten (Lindow *et al.*, 2007). Deze onderzoeksresultaten bevestigen de observaties van Kuenen (1944), die verschillende laaglandbekken in Drenthe onderzocht. Ook Kuenen (1944) concludeerde dat laterale ontwikkeling gering was, voor het grootste deel van de onderzochte beken.

Tabel 1 IN NEDERLAND VOORKOMENDE BEEKTYPEN VOLGENS KRW-TYPOLOGIE

	KRW-TYPE	VERHANG (m/km)	BREEDTE (m)	STROOMGEBIED (km ²)	ONDERGROND	TOT. BEEKLENGTE (km (% van totaal))
LAAGLAND	R4	<1	0-3	0-10	zand	586 (15.7)
	R5	<1	3-8	10-100	zand	2144 (57.4)
	R6	<1	8-25	100-200	zand	708 (19.0)
HEUVELLAND	R12	<1	3-8	10-100	veen	99 (2.7)
	R13	>1	0-3	0-10	zand	29 (0.8)
	R14	>1	3-8	10-100	zand	25 (0.7)
	R17	>1	0-3	0-10	kalk	55 (1.5)
	R18	>1	3-8	10-100	kalk	88 (2.3)
						3733 (100)

Vraagstelling

Binnen de Community of Practice (CoP) Hermeanderen wordt kennis met betrekking tot beekherstel uitgewisseld tussen waterschappen en kennisinstellingen. Vanuit de CoP is een aantal kennisvragen opgesteld die de problematiek met betrekking tot de beekmorphologie samenvatten. De belangrijkste zes vragen waren:

- Hoeveel ruimte is nodig voor (her-)meanderen?
- Hoe gevoelig is een beekontwerp voor veranderende afvoeren?
- Hoeveel zand komt er uit een hermeanderingsproject?
- Welke eisen stellen ecologisch beekwaarden aan hermeanderen?
- Zijn er vuistregels op te stellen voor het ontwerp, de aanleg en het beheer van een herstelde beek met betrekking tot de morfologie?

-
- Aan welke voorwaarden moet een monitoringsplan voldoen om de morfodynamiek van een beekherstelproject te kunnen monitoren?

In dit onderzoeksrapport ligt de nadruk op de laatste twee kennisvragen. De overige vier vragen komen aanbod, maar zijn specifiek gericht op bepaalde morfologische en hydrologische processen. Aan de hand van vijf praktijkvoorbeelden is geprobeerd antwoord te krijgen op de laatste twee kennisvragen. Samenvattend is het doel van dit onderzoek het in kaart brengen van de morfodynamiek van vooral herstelde, Nederlandse laaglandbekken, ontleent aan de Nederlandse beekherstelpraktijk.

Leeswijzer

Het grootste deel van de resultaten van dit onderzoek heeft betrekking op vijf beken. In het volgende hoofdstuk worden de vijf beken geïntroduceerd en wordt kort beschreven hoe de data in het veld zijn ingewonnen. Vervolgens worden in vier inhoudelijke hoofdstukken de belangrijkste bevindingen samengevat. Er worden vier thema's onderscheiden: Ontwikkeling bovenaanzicht ([Hoofdstuk Ontwikkeling](#)), Lengteprofiel ([Hoofdstuk Lengteprofiel](#)), Oevererosie ([Hoofdstuk Oevererosie](#)) en Kleinschalige morfodynamiek ([Hoofdstuk Kleinschalige morfodynamiek](#)). In ieder van deze hoofdstukken zal het onderwerp worden uitgelegd aan de hand van een aantal literatuurvoorbeelden. Daarnaast worden voorbeelden uit het veld uitgelegd in een aantal kaders, hierin vindt de verdieping plaats. Het rapport wordt afgesloten [Conclusies](#) en [Aanbevelingen voor de praktijk](#).

H2 VELDLOCATIES



Gedurende een periode van 3 jaar zijn veldgegevens in verschillende beken in Nederland ingewonnen. Het grootste deel van de veldgegevens is ingewonnen in vier beekherstelprojecten (Hagmolenbeek, Hooge Raam, Lunterse beek en Tungelroyse beek). In de Hagmolenbeek, Lunterse beek en Tungelroyse beek is een standaard monitoringsplan geïmplementeerd. De monitoring in de Hooge Raam wijkt af van de andere drie beekherstelprojecten. Daarnaast is een historische analyse gemaakt van een oorspronkelijk recht aangelegd kanaal (Gelderns-Nierskanaal), dat in de afgelopen ruim 200 jaar de ruimte heeft gekregen zich morfologisch te ontwikkelen. [Figuur 4](#) laat de locaties van de vijf beken in Nederland zien.

In [Tabel 2](#) zijn de belangrijkste kenmerken van de vijf beken opgesomd. Van de vijf beken vallen drie beken onder het bovengenoemde laaglandbeektype (R5): de Hagmolenbeek, de Lunterse beek en de Tungelroyse beek. De Hooge Raam, zoals aangelegd, en het Gelderns-Nierskanaal hebben een te groot verhang (respectievelijk 1.8 en 3.8 m/km) om als laaglandbeek te worden geklassificeerd.

Toch zijn beide beken opgenomen in dit rapport. De Hooge Raam is opgenomen, omdat na verloop van tijd het verhang is afgenumen naar een waarde lager dan 1 m/km. Het Gelderns-Nierskanaal is opgenomen omdat in het bovenstroomse deel het verhang lager is dan 1 m/km (namelijk 0.48 m/km). De mediane korrelgrootte van de herstelde beken komt overeen met fijn zand. In het Gelderns-Nierskanaal komt met name in het benedenstroomse deel veel grind voor. Het bovenstroomse deel, daarentegen, wordt gedomineerd door grof zand.

In de onderste regel van de tabel is een maat voor de afvoervariatie (Annual coefficient of flow variation; Poff & Ward, 1989) opgesomd. Deze coëfficiënt is bepaald door de standaard deviatie van de afvoer te delen door de gemiddelde jaarlijkse afvoer. Over het algemeen hebben de bestudeerde beken een ‘flashy’ afvoerregime, met lage (basis) afvoeren in de zomer en incidentele piekafvoeren in de winter. Dit uit zich in hoge waarden voor de afvoervariatie.

Deze waarden komen volgens Poff & Ward (1989) overeen met een sterk piekend en bijna droogvallend afvoerregime. De minste afvoervariatie is geobserveerd in de Tungelroyse beek en de meeste in de Lunterse beek. Rivieren of beken met een natuurlijk gedempte dynamiek hebben een afvoervariatie met een waarde van ongeveer 30 (Poff & Ward, 1989).

Fig 4

LOKATIE VAN DE VIJF STUDIEGEBIEDEN IN NEDERLAND

De kaart bevat ook de lokaties van de grote rivieren, laaglandbekken en de grondsoortenkaart (Alterra, 2006).

— grote rivieren	■ lichte klei	■ water
— laaglandbekken	■ lichte zavel	■ zand
■ bebouwing, enz.	■ moerig op zand	■ zware klei
■ leem	■ veen	■ zware zavel



Tabel 2 KARAKTERISTIEKEN VAN DE VIJF STUDIEGEBIEDEN

BEEK	HAGMOLEN-BEK	HOOGERAAAM	LUNTERSE BEEK	GELDERNS-NIERSKANAAL	TUNGELOYSE BEEK
KRW-TYPE	R5	R14	R5	R14	R5
breedte (aangelegd)	(m)	2	7,5	6,5	8,8
diepte (aangelegd)	(m)	0,4	0,4	0,4	1,2
verhang (aangelegd)	(m /km)	0,5	1,8	0,96	3.8 (0.48)
sinuositeit (aangelegd)	(-)	1,2	1	1,24	1,19
mediane korrelgrootte	(µm)	188	218	258	18100 (800)
gemiddelde afvoer	(m³/s)	0,15	0,22	0,31	0,71
jaarlijkse piekafvoer	(m³/s)	0,99	2,03	3,55	4,07
afvoervariatie	(-)	123,2	119,5	138,5	91,5
					77,4

Hermeanderingsprojecten

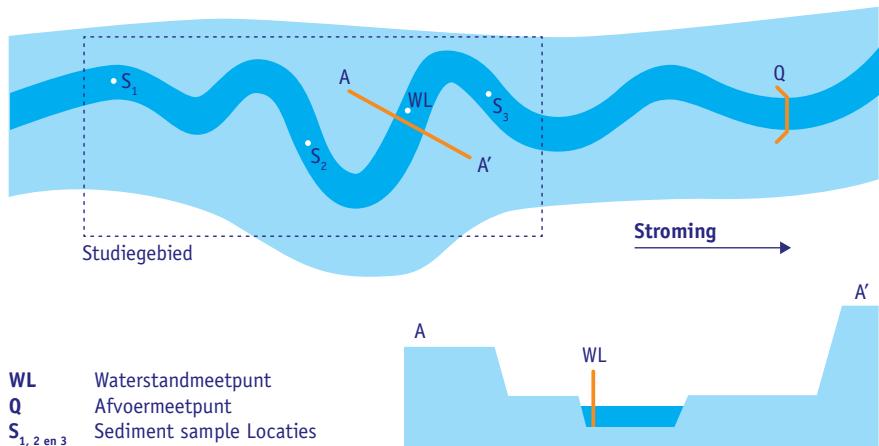
In drie hermeanderingsprojecten is over een periode van 2 jaar de morfologie en hydrologie gemonitord. In de drie beken is een standaard monitoringsplan geïmplementeerd, schematisch weergegeven in [Figuur 5](#). [Tabel 3](#) laat de verschillen in monitoring tussen de drie hermeanderingsprojecten zien. De resultaten van deze drie hermeanderingsprojecten zijn ook te vinden in Eekhout *et al.* (2014a).

Tabel 3 MONITORINGSKARAKTERISTIEKEN VAN DE HERMEANDERINGSPROJECTEN

	HAGMOLEN-BEK	LUNTERSE BEEK	TUNGELOYSE BEEK
lengte onderzoeksgebied	(m)	385	250
aantal dwarsraaien	(-)	46-69	30-51
afstand tussen dwarsraaien	(m)	2.5-12	3.5-10
meetperiode	(-)	sep 2010-jul 2012	okt 2011-aug 2013
			jun 2011-aug 2013

Fig 5

SCHEMATISCH OVERZIKT MONITORING HERMEANDERINGSPROJECTEN

**Morfologie**

De morfologie is over een beeklengte van tussen 250 en 385 meter ingemeten met GPS-apparatuur (Leica GPS 1200+). Met deze apparatuur is het mogelijk om een punt in de ruimte, hoogte (m+NAP) en positie (RD-coördinaten), in te meten met een onnauwkeurigheid van minder dan 2 cm. De morfologie is ingemeten door middel van dwarsraaien, waarbij de afstand tussen de dwarsraaien varieerde tussen 2.5 en 12 meter. De afstand tussen de raaien is verkleind in gebieden waar meer morfologische activiteit viel te verwachten (met name in bochten). In totaal zijn tussen 30 en 69 dwarsraaien per meetmoment ingemeten. Er zijn in totaal 3 metingen gedaan, d.w.z. één keer per jaar.

In het benedenstroomse deel van de Lunterse beek is de meetstrategie aangepast om rekening te houden met een meer complexe morfologische ontwikkeling. De afstand tussen de dwarsraaien is verkleind tot 1.7–4.5 meter. De hoge ruimtelijke resolutie maakt het mogelijk om de data op een rekengrid te interpoleren. Hierdoor kunnen morfologische details in beeld gebracht worden. Ook is de temporele resolutie verkleind naar gemiddeld 8-9 metingen per jaar. Een uitgebreide analyse van dit deel van de Lunterse beek is te vinden in Eekhout & Hoitink (2014), Eekhout *et al.* (2014) en Eekhout *et al.* (2014c).

Sediment

Het sediment van de beekbodem is bemonsterd bij aanleg en aan het eind van de meetperiode, na twee jaar. Sedimentmonsters zijn genomen op drie locaties in het studiegebied: bovenstrooms, halverwege en benedenstrooms. De monsters zijn gezeefd met behulp van een schudmachine. Door het gewicht van elk deelmonster te bepalen wordt de korrelgrootte verdeling verkregen. Uit de korrelgrootte verdelingen zijn mediane korrelgroottes bepaald (de korrelgrootte waarvan 50% van het monster fijner is).

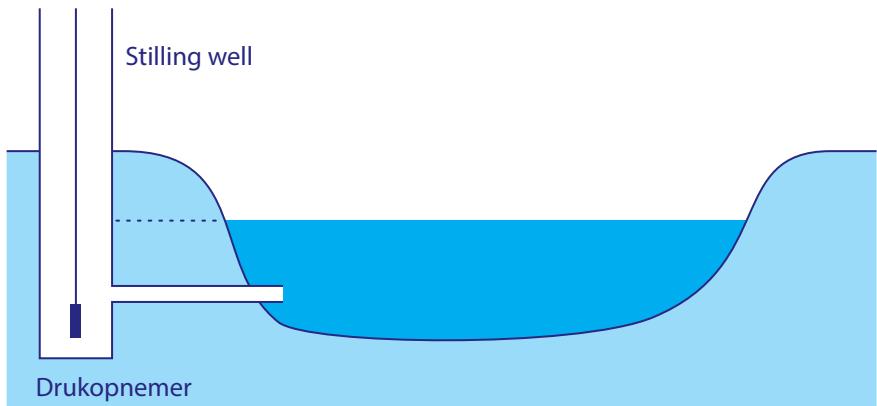
Hydrologie

Er zijn continue afvoer- en waterstandsmetingen verricht. Bij een meetstuw (buiten het studiegebied) is de afvoer gemeten. De afvoertijdseries zijn opgenomen in [Bijlage A: Afvoertijdseries](#). Binnen het studiegebied is het waterpeil gemeten met behulp van een zogenaamde stilling well, inclusief drukopnemer. Met behulp van de gemeten dwarsprofielen ter hoogte van de stilling well zijn doorstroomoppervlakken bepaald. De gemiddelde stroomsnelheid is verkregen door de afvoer te delen door het doorstroomoppervlak. Tijdens de morfologische metingen zijn, naast dwarsraaien, ook waterstandsprofielen in langsrichting ingemeten.

Fig 6

STILLING WELL

Een buis is verticaal in de oever geplaatst en met een kleinere horizontale buis met de beek verbonden. Het waterpeil in de buis is gelijk aan het beekpeil. Via een drukopnemer wordt het waterpeil continu gemeten.



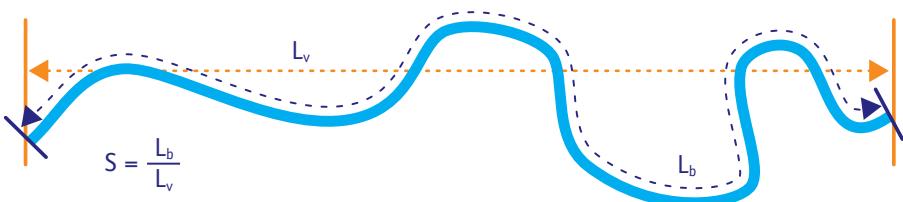
Historisch kaartmateriaal

Van elk van de drie hermeanderingsprojecten waren historische kaarten aanwezig die inzicht verschaffen in de veranderingen van het bovenaanzicht in de periode vóór kanalisatie, zie [Bijlage B: Historische kaarten](#). Van het bovenaanzicht van de beken is de sinuositeit bepaald, dat wil zeggen, de verhouding tussen de lengte van de beek en de directe lengte tussen begin en eind van de beek ([Figuur 7](#)). Op basis van de verandering van de sinuositeit kan bepaald worden of de beek in het verleden de kenmerken had van een actief meanderende rivier.

Fig 7

SINUOSITEIT

De verhouding tussen de lengte van de beek (L_b) en de directe lengte tussen begin en eind van de beek (L_v).



Casus: Hooge Raam

Het ontwerp van de Hooge Raam wijkt af van de hermeanderingsprojecten. In de Hooge Raam is een rechte waterloop aangelegd. Het doel van het project was door autogene morfologische processen een natuurlijke waterloop te laten ontstaan. Met autogene morfologische processen worden processen bedoeld die uit zichzelf optreden, zonder externe invloeden. [Figuur 8](#) laat een overzicht van het studiegebied zien. Het projectgebied is opgedeeld in het bovenstroomse experimentele traject en het benedenstroomse hermeandertraject (paneel c). Het experimentele traject heeft een breed en ondiep dwarsprofiel gekregen (paneel d), waarbij na bijna twee jaar een inundatiezone is aangelegd. Het hermeandertraject heeft een smal en diep dwarsprofiel gekregen (paneel e). De meeste morfologische metingen zijn in het benedenstroomse deel van het experimentele traject uitgevoerd. In dit deel van de beek zijn op de beekbodem acht maanden na aanleg alternerende ban-

ken ontstaan. Dit zijn bodemvormen die verband houden met de initiatie van meandering. Het project wordt getypeerd als een veldexperiment. De morfologische processen en een uitwerking van twee theoretische bankmodellen zijn te vinden in Eekhout *et al.* (2013b) en Eekhout *et al.* (2014b).

Morfologie

Net als in het benedenstroomse deel van de Lunterse beek is in de Hooge Raam met een hoge ruimtelijke en temporele resolutie gemeten. De afstand tussen de dwarsraaien bedroeg in de Hooge Raam 2-3 meter. Daarnaast is vanaf het moment dat de alternerende banken zijn ontstaan (na acht maanden) een meetfrequentie van 7 keer per jaar aangehouden. De ingemeten morfologische data zijn geïnterpolerd op een rekengrid om de morfodynamiek in detail in beeld te kunnen brengen. Naast de detail morfodynamiek is ook van elke morfologische meting het verhang van het experimentele traject bepaald.

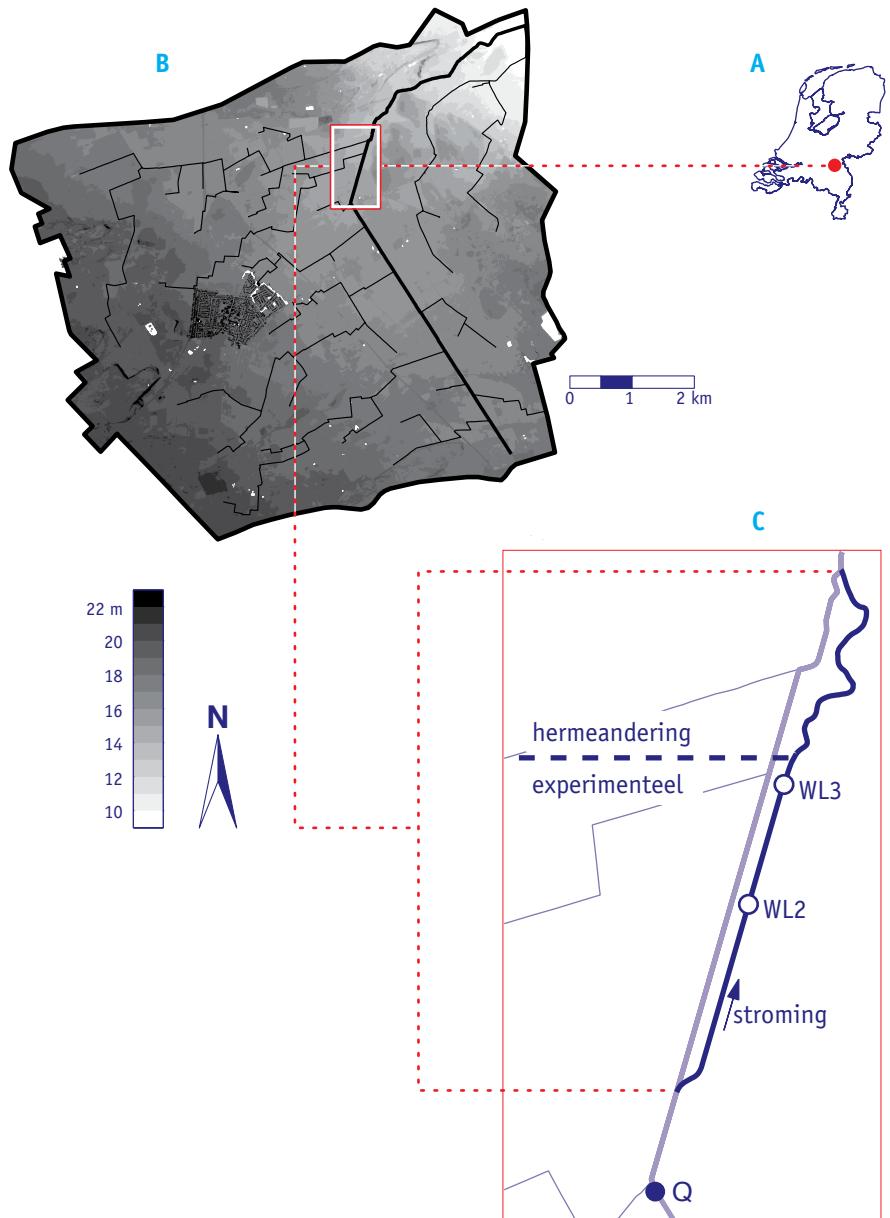
Hydrologie

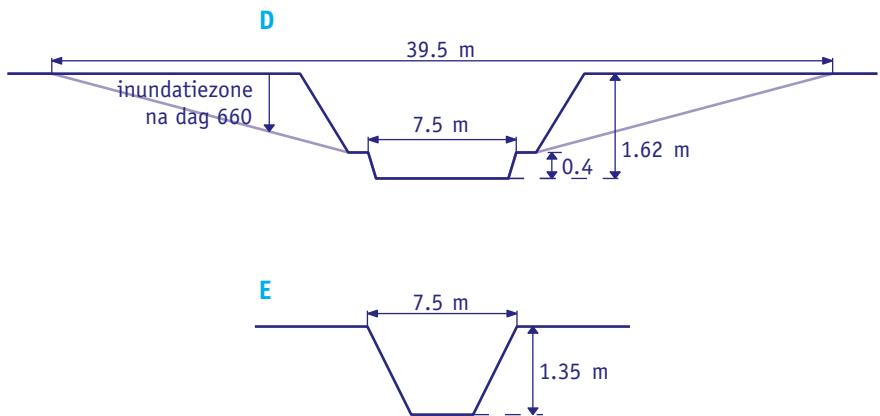
Afvoeren en waterstanden zijn gemeten bij respectievelijk een meetstuw en twee stilling wells. De afvoertijdserie is opgenomen in [Bijlage A: Afvoertijdseries](#). Waterstandsprofielen in de langsrichting zijn tijdens de morfologische metingen ingemeten. Tijdens één morfologische meting markeerde opgehoopte takken en ander organisch materiaal de hoogte van de waterstand tijdens een hoge afvoer. Ook dit profiel is in langsrichting ingemeten.

Casus: Gelderns-Nierskanaal

Het Gelderns-Nierskanaal is de enige onderzoekslokatie waar geen beekherstel heeft plaatsgevonden. Daarnaast is het strikt genomen geen beek, maar een kanaal. Het Gelderns-Nierskanaal is aangelegd aan het eind van de 18^{de} eeuw, met als doel om piekafvoeren op de Niers in Duitsland te verlagen. Het kanaal loopt vanaf de Niers in Duitsland in een boog richting Nederland, om bij de Hamert uit te monden in de Maas, zie [Figuur 9](#). Waar het Duitse deel van het kanaal geen morfologische activiteit heeft vertoond, zijn in het Nederlandse deel van het kanaal de oevers vrij gelaten, wat geresulteerd heeft in een actief meanderende waterloop. Een historische analyse heeft de morfologische ontwikkeling van het kanaal in beeld gebracht. De focus in dit rapport is met name op de veranderingen van het bovenaanzicht van het bovenstroomse deel van het kanaal. Een uitgebreide analyse is te vinden in Eekhout *et al.* (2013) en Eekhout *et al.* (2013a).

Fig 8 OVERZIET VAN HET STUDIEGEBIED HOOGE RAAM
Dit figuur is gebaseerd op Figuur 1 in Eekhout et al. (2013b).





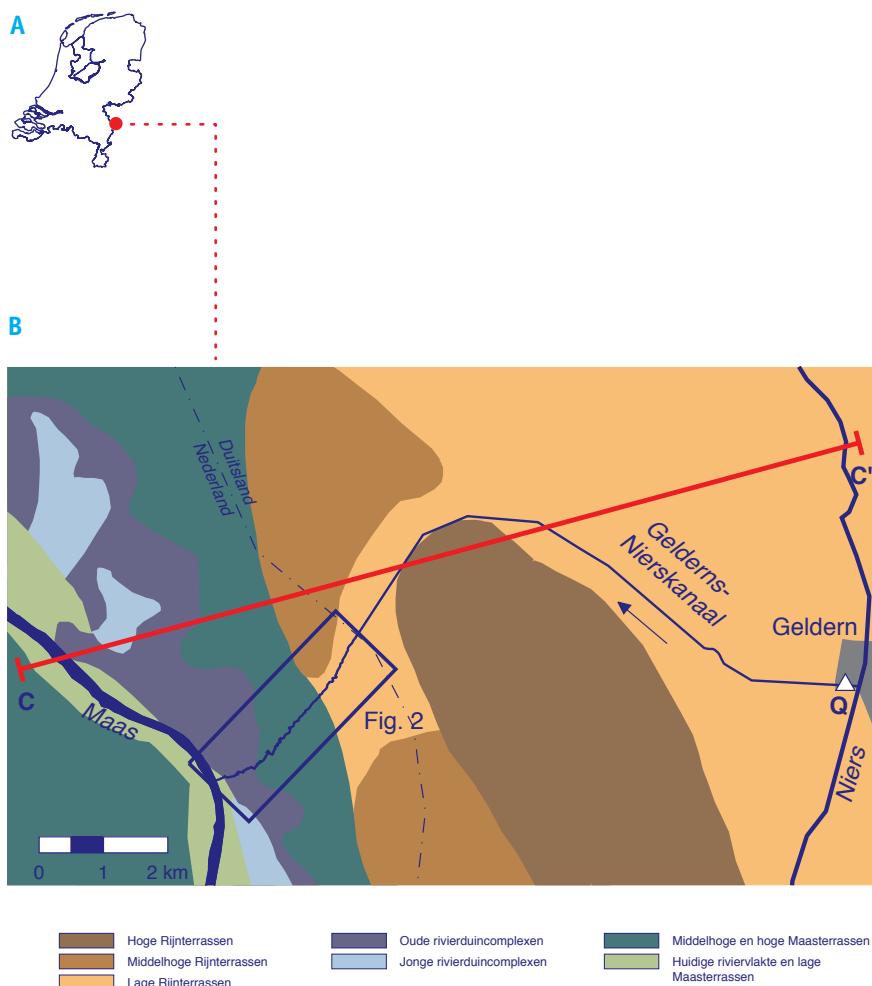
Historisch kaartmateriaal

Sinds de aanleg aan het eind van de 18^{de} eeuw zijn 12 historische kaarten van het onderzoeksgebied verschenen. Het bovenaanzicht van het kanaal is uit de historische kaarten gehaald. Van de planimetrische ligging is de sinuositeit bepaald. De ontwikkeling van de sinuositeit laat zien hoe actief het kanaal in de afgelopen twee eeuwen zijn loop heeft verlegd.

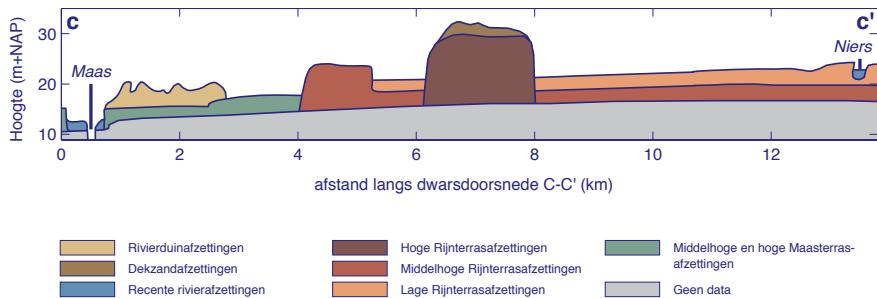
Fig 9

OVERZIJK VAN HET ONDERZOEKSGBIED VAN HET GELDERNS-NIERSKANAAL

Met (a) de locatie in Nederland, (b) een geomorfologische kaart van het onderzoeksgebied en (c) een schematische dwarsdoorsnede van de ondergrond langs het transect C-C' in (b). Dit figuur is gebaseerd op Figuur 1 in Eekhout et al. (2013).



C



H3 ONTWIKKELING BOVENAANZICHT



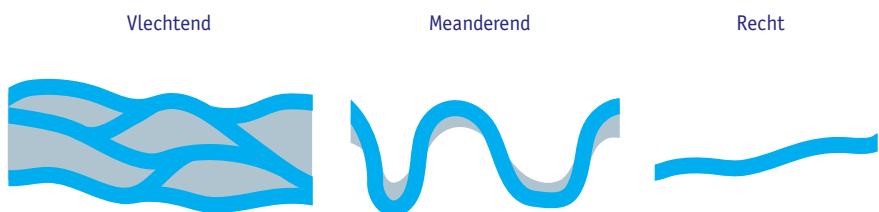
Er wordt in de literatuur onderscheid gemaakt tussen verschillende rivierpatronen: vlechtende, meanderende en rechte verschijningsvorm (Figuur 5; Leopold & Wolman, 1957). Het bovenaanzicht van Nederlandse laaglandbekken kan geïnterpreteerd worden als meanderend. Een typisch kenmerk van een meanderende beek of rivier is dat de afvoer is geconcentreerd in één waterloop, in tegenstelling tot vlechtende beken en rivieren die uit meerdere waterlopen bestaan.

Een meanderende loop kan actief van positie veranderen, doorgaans door oevererosie in de buitenbocht en aanzanding in de binnenbocht. Dit leidt tot een toename van de sinuositeit, tot het moment van bochtafsnijding. Wanneer bochtafsnijding plaatsvindt, neemt de sinuositeit weer af en begint het proces weer van vooraf aan. Al deze processen samen kunnen samengevat worden als actief meanderen.

Fig 10

RIVIERPATRONEN

Recht, meanderend en vlechtend (naar Leopold & Wolman, 1957).



De bovengenoemde processen spelen zich op lange tijdschalen af (tientallen tot honderden jaren). Om dit soort processen te observeren zijn dus langdurige tijdreeksen van het bovenaanzicht van een rivier nodig. Deze kunnen worden verkregen uit historisch kaartmateriaal (zie [Kader: Historische ontwikkeling](#)). Het onderzoek in het Gelderns-Nierskanaal is grotendeels gebaseerd op dergelijke kaarten.

Het kanaal, dat aangelegd is aan het eind van de 18^{de} eeuw, is in meer dan 200 jaar de vrije loop gelaten. Het bood daarom een uitgelezen mogelijkheid om de ontwikkeling van het bovenaanzicht in de tijd te volgen.

Het onderzoek naar het Gelderns-Nierskanaal heeft inzicht verschafft in de ontwikkeling van het bovenaanzicht van een actief meanderende waterloop in een relatief steil gebied in Nederland. Met name in het benedenstroomse deel van het kanaal hebben spectaculaire ontwikkelingen plaatsgevonden. Deze ontwikkelingen zijn niet representatief voor de huidige Nederlandse laaglandbekken. Enerzijds is het verhang in dit deel van het kanaal relatief groot (>3.5 m/km) en anderzijds bestaat het sediment voornamelijk uit grind. Dit zijn atypische kenmerken voor laaglandbekken, waar het verhang veel lager is (<1 m/km) en het sediment bestaat uit zand (zie ook [Tabel 1](#)).

Het bovenstroomse deel van het Gelderns-Nierskanaal komt beter in de buurt van de typische kenmerken van Nederlandse laaglandbekken, met een verhang van 0.48 m/km en sediment dat bestaat uit zand, zij het grof. De ontwikkeling van de sinuositeit van dit deel vertoont weinig variatie. Dit wijst erop dat dit deel van het kanaal een stabiel rivierpatroon heeft. De beek heeft een kronkelend karakter, maar kan niet als actief meanderende rivier worden getypeerd.

Van de drie hermeanderingsprojecten is ook een analyse uitgevoerd op basis van historische kaarten, voor de periode vóór kanalisatie. In de Hagemolenbeek en Tun-gelroyse beek is in deze periode bijna geen variatie in sinuositeit waar te nemen. Ook deze beken hebben een kronkelend karakter, maar laten geen actieve, zich voortzettende meanderprocessen zien. De Lunterse beek, daarentegen, laat wel enige variatie van de sinuositeit zien, maar ook dit is geen actief meanderende beek. Op basis van de historische analyses kan vastgesteld worden dat de onderzochte beken in het verleden een kronkelend karakter hadden, met incidenteel ontwikkeling van het bovenaanzicht, maar waar actieve meandering, zoals in de eerste paragraaf is uitgelegd, niet is geobserveerd.

De morfologische ontwikkeling van het bovenaanzicht van een beek vindt niet of slechts incidenteel, schoksgewijs plaats. Hoe zijn deze kronkels dan toch ontstaan? Zowel het veldexperiment in de Hooge Raam, als de historische ontwikkeling van het Gelderns-Nierskanaal geven hier inzicht in.

In het veldexperiment ([Kader: Alternerende banken](#)) is gebleken dat in een rechte waterloop met een voor laaglandbegrippen groot verhang alternerende banken kunnen ontstaan. Alternerende banken worden in verband gebracht met de initi-

atie van meandering. Als gevolg van stuweffecten is het verhang afgenummerd, tot waarden onder 1 m/km, zie ook [Kader: Aanpassing lengteprofiel als gevolg van versmallung](#). In dezelfde periode is het regelmatige alternerende bankenpatroon verdwenen. Zelfs in geval van een initieel relatief grote verhang (1.8 m/km) en fijne sediment biedt de klassieke theorie van ontstaan van meandering niet de juiste verklaring.

Externe factoren kunnen een belangrijke invloed hebben gehad op de ontwikkeling van het bovenaanzicht van de Nederlandse laaglandbekken. In het Gelderns-Nierskanaal (Eekhout, et al., 2013) is opgevallen dat bochtontwikkeling is geïnitieerd op locaties waar in het verleden kwel is opgetreden. Kwel kan, door toename van het vochtgehalte van de oever, lokaal tot zwakkere oevers leiden. Wanneer deze zwakkere oevers eroderen, kan er een proces op gang komen dat kan leiden tot het verleggen van de waterloop. In het geval van het Gelderns-Nierskanaal heeft dit zelfs tot een meanderende beek geleid, maar vaker zal een incidentele bochtontwikkeling worden gevolgd door een lange inactieve periode.

Niet alleen kwel kan een externe factor zijn die morfodynamiek op gang kan brengen. In Nederlandse laaglandbekken kunnen ook bomen een obstakel vormen, waar een beek omheen zal stromen. Ook grindbanken, veenpakketten of andere grondsoorten die voor heterogeniteit zorgen, kunnen een aanzet vormen voor dit proces.

De resultaten uit het veldexperiment van de Hooge Raam laten zien dat autogene processen, het ontstaan van alternerende banken, gevolgd door oevererosie en de vorming van meanderbochten, waarschijnlijk niet tot het kronkelende karakter van waterlopen hebben geleid. Daarom moeten er exogene processen zijn geweest die het meanderproces opgang hebben gebracht. Exogene processen zijn processen die van buitenaf gestuurd worden, zoals kwel in combinatie met heterogeniteit van de ondergrond. Dit in tegenstelling tot autogene processen, die tot ritmische morfologische patronen leiden door stroming van water en het sedimenttransport in de beek zelf. Nederlandse laaglandbekken behoren, op basis van hun historische ontwikkeling, niet tot actief meanderende rivieren, maar hebben een kronkelend en vooral statisch karakter. Incidentele gebeurtenissen, mogelijk in een heterogeen landschap ontstaan na de laatste IJstijd, kunnen dominant zijn geweest bij het ontstaan van de kronkelende waterlopen in Nederland.

KADER HISTORISCHE ONTWIKKELING

Bij het ontwerp van het bovenaanzicht van een beekherstelproject wordt vaak gebruik gemaakt van historisch kaartmateriaal. Deze historische kaarten geven een idee van de sinuositeit van de beek voor kanalisatie. De historische sinuositeit kan gebruikt worden als inspiratie voor de sinuositeit voor de nieuwe loop.

Historische kaarten kunnen ook gebruikt worden om een inschatting te maken van de historische meanderactiviteit. De historische kaarten zijn opgenomen in [Bijlage B: Historische kaarten](#). Het onderzoek van het Gelderns-Nierskanaal was hier volledig op gefocust. Het onderzoek naar de meanderactiviteit in het Gelderns-Nierskanaal heeft inzicht verschafft in het ontstaan van meanders. Er is gebleken dat lokale kwel een belangrijke rol heeft gespeeld in het ontstaan van meanderbochten. Het benedenstroomse deel van het kanaal, waar de grootste meanderactiviteit is waargenomen, komt qua verhang en sediment niet overeen met Nederlandse laaglandbekken. Het bovenstroomse deel, daarentegen, heeft wel overeenkomsten met Nederlandse laaglandbekken. Met name het verhang valt daar in het bereik van Nederlandse laaglandbekken (< 1 m/km). Ook in dit deel van de beek heeft lokale kwel voor verzwakte oevers gezorgd en is een meander ontstaan. Dit soort zwakke oevers kunnen de aanzet zijn voor het meanderproces, ook onder de condities die overeenkomen met laaglandbekken,

In [Figuur 11](#) is het historische verloop van de sinuositeit van beide delen van het Gelderns-Nierskanaal te zien. De ontwikkeling van het benedenstroomse deel (oranje lijn) heeft de kenmerken van actieve meandering. Initieel is een toename van de sinuositeit te zien. Tot 1930 blijft deze vervolgens constant. Daarna is een scherpe toename te zien en daarna een afname. Deze ontwikkelingen kunnen worden toegeschreven aan de vorming van hoefijzervormige meanderbochten, die vervolgens worden afgesneden. In meanderende rivieren komt het vaker voor dat verschillende bocht afsnijdingen kort na elkaar optreden. Wanneer een bocht afsnijding plaatsvindt, ontbreekt het in een deel van de rivier aan een dynamisch morfologisch evenwicht. Dit heeft lokaal stuweffecten tot gevolg en kan een trigger zijn voor een volgende bocht afsnijding. In de periode nadat de bocht afsnijdingen had plaatsgevonden bleef de sinuositeit relatief laag, maar er is weer een toename te zien aan het begin van de 21^{ste} eeuw. Er hebben zich weer nieuwe hoefijzervormige meanders gevormd en het proces begint weer opnieuw.

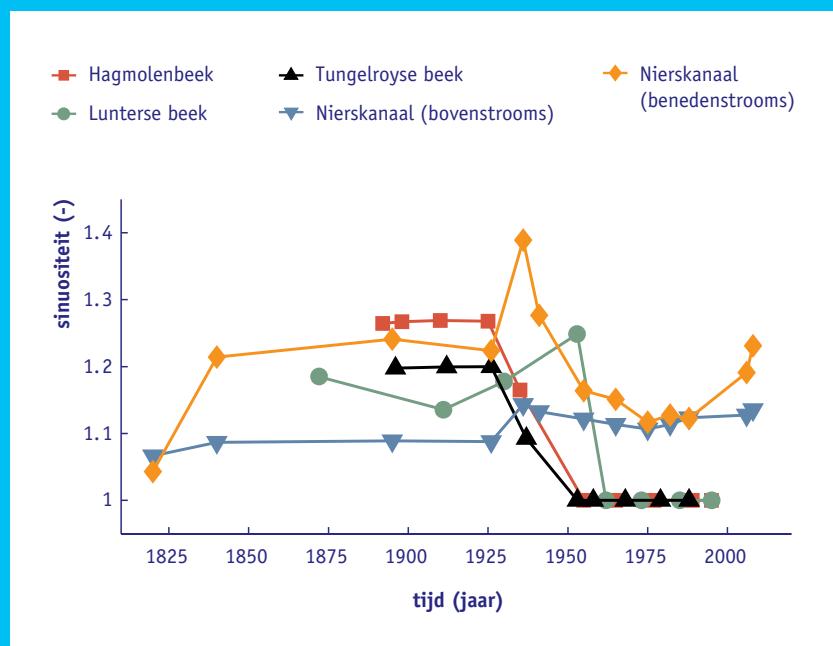
Het bovenstroomse deel van het Gelderns-Nierskanaal laat een ander verloop zien (witte lijn). De sinuositeit van dit deel van het kanaal was op de eerste historische kaart verge-

lijkaar met het benedenstroomse deel. In de periode tot 1930 is er weinig ontwikkeling te zien. Vervolgens neemt de sinuositeit toe tot een waarde van 1.14, waarna het bovenaanrecht weer stabiel blijft tot aan de laatste historische kaart.

Van de beekherstelprojecten is eenzelfde historische analyse uitgevoerd. De Hooge Raam is al aan het eind van de 19^{de} eeuw rechtgetrokken; er was daarom te weinig historisch kaartmateriaal om deze analyse uit te voeren. De Hagmolenbeek, Lunterse beek en Tungelroyse beek zijn respectievelijk in de perioden 1935 – 1955, 1953 – 1962 en 1937 – 1953 rechtgetrokken. Er waren in alle gevallen minimaal 3 historische kaarten beschikbaar om de analyse mee uit te voeren, die een periode van 57-90 jaar beschrijven. Ook van deze historische kaarten is de sinuositeit van het bovenaanrecht bepaald, zie [Figuur 11](#).

Fig 11 SINUOSITEIT

Historisch verloop van de sinuositeit van de Hagmolenbeek, Gelderns-Nierskanaal, Lunterse beek en Tungelroyse beek.



Er is een bijna identiek verloop van de sinuositeit van de Hagmolenbeek en de Tungelroyse beek te zien. In de periode tot 1935/1937 is het bovenaanzicht nagenoeg stabiel gebleven. Vervolgens is er een afname te zien, die ertop wijst dat de beken stapsgewijs zijn rechtgetrokken. Vanaf het begin van de jaren 50 zijn de beken gекanaliseerd en heeft de sinuositeit dan ook een waarde van 1. De Lunterse beek laat een ander verloop zien. De periode voor de kanalisatie (1872 – 1953) kenmerkt zich door een dynamische ontwikkeling van het bovenaanzicht. In deze periode varieerde de sinuositeit tussen 1.1 en 1.3. De Lunterse beek is niet in stappen gекanaliseerd. De kanalisatie vond plaats tussen 1953 en 1962, wat een dramatische afname van de sinuositeit tot gevolg had.

Deze historische analyse geeft inzicht in het verloop van het bovenaanzicht van de onderzoeksgebieden. In het geval van het Gelderns-Nierskanaal is naast de analyse van de historische kaarten ook onderzoek gedaan naar andere historische data, zoals de waterstanden in de Maas en informatie die uit de bodemopbouw is te halen. Op basis van deze extra informatie was het mogelijk om verschillende morfologische ontwikkelingen te reconstrueren. Deze informatie ontbreekt voor de hermeanderingsprojecten. Om vast te stellen of de relatief dynamische ontwikkeling in de Lunterse beek een uitzondering op de regel is, zou verder onderzoek gedaan moeten worden naar gebiedseigenschappen die invloed kunnen hebben op de laterale ontwikkeling. Daarbij kan gedacht worden aan het type ondergrond en het historische landgebruik.

KADER ALTERNERENDE BANKEN

Alternerende banken zijn bodemvormen die in verband worden gebracht met de initiatie van meandering. Onder bepaalde omstandigheden kunnen deze bodemvormen ontstaan. De vorming van alternerende banken hangt af van het verhang, het type sediment en met name de breedte-diepte verhouding van de waterloop. Het verhang moet groot genoeg zijn om voldoende sedimenttransport te kunnen laten plaatsvinden, waarbij dit verhang afhankelijk is van het soort sediment. Daarnaast laten modellen en laboratoriumexperimenten zien dat alternerende banken alleen ontstaan wanneer de breedte-diepte verhouding rond een relatieve hoge, kritische waarde ligt. De morfologische ontwikkeling in van het veldexperiment in de Hooge Raam laten zien dat de criteria voor het optreden van alternerende banken erg specifiek zijn. In de Hooge Raam is een veldexperiment uitgevoerd. Het doel van het experiment was om te onderzoeken of het in een laaglandbeek mogelijk is om vanuit een rechte waterloop een kronkelende waterloop te laten ontstaan. Er is over een lengte van ruim 600 meter een rechte waterloop aangelegd, met een breedte van 7.5 m en een diepte van 0.4 m.

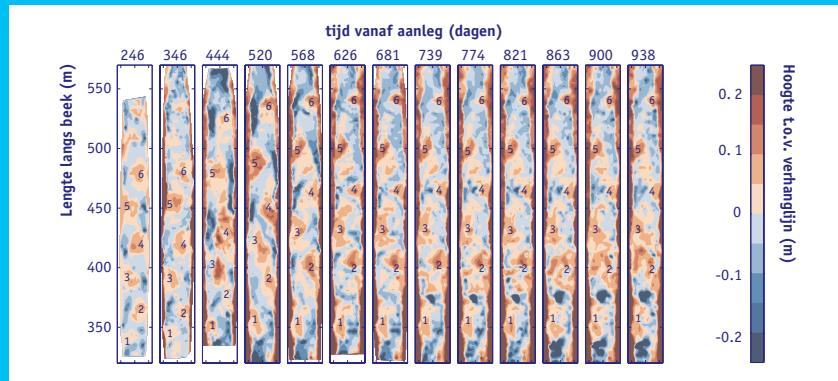
Fig 12 LUCHTFOTO VAN HET EXPERIMENTELE TRAJECT VAN DE HOOGE RAAM

De foto is 352 dagen na aanleg genomen.



Fig 13 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING HOOGE RAAM

De cijfers 1 t/m 6 geven de locaties van de banken tijdens elke meting aan. De kleuren rood en blauw geven respectievelijk de alternerende banken en de geul eromheen aan. Het water stroomt van beneden naar boven. Dit figuur is gebaseerd op Figuur 6 in Eekhout et al. (2013b)



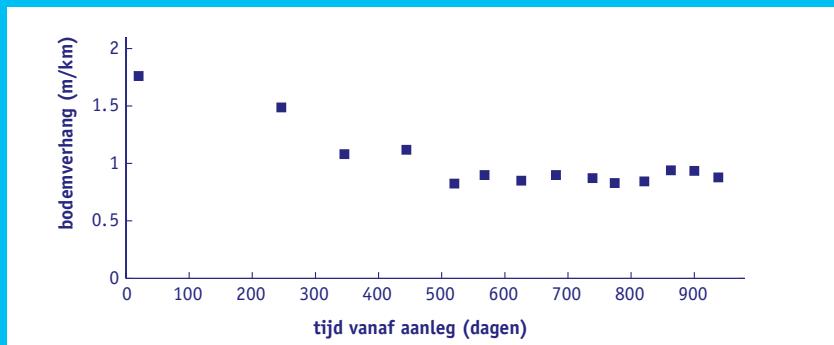
Acht maanden (246 dagen) na aanleg zijn de alternerende banken voor het eerst geobserveerd in het experimentele traject, zie [Figuur 13](#). In het figuur is te zien dat in er weinig verandering plaatsvond tot aan de volgende meting. Het patroon is ook goed vanuit te lucht te herkennen ([Figuur 12](#)). Deze luchtfoto is 352 dagen na aanleg genomen en laat een duidelijk altererend banken patroon zien. Hierna namen de morfologische veranderingen toe. Bij de vijfde meting is een min-of-meer kronkelende thalweg te zien. Daarnaast geven de donker rode en blauwe kleuren aan dat de banken in hoogte toenamen. Ook valt op dat de banken in benedenstroomse richting verplaatsen. Dit is voor een groot deel te wijten aan een eenzijdig toegenomen banklengte.

In de periode na meting vijf (dag 568) is te zien dat met name in het benedenstroomse deel de donker blauwe kleuren verdwijnen, als gevolg van een afname van de bankhoogte. Aan de andere kant is te zien dat er een meer complexe morfologie is ontstaan; het kronkelende pad dat de stroomdraad markeert is verdwenen. Ook ontstaan er in het bovenstroomse deel diepe kuilen. Bij de laatste meting zijn de banken bijna niet meer als zodanig te herkennen, zoals dat wel bij de eerste vijf metingen wel het geval was. Samenvattend is het regelmatige alternerende bankenpatroon grotendeels verdwenen en heeft het plaatsgemaakt voor een complexere morfologie.

De belangrijkste oorzaak van deze morfologische aanpassing is te vinden in de ontwikkeling van het verhang. In [Figuur 14](#) is het verloop van het bodemverhang in de tijd te zien. Bij aanleg was het verhang 1.8 m/km. Dit is een hoger verhang dan gebruikelijk voor laaglandbekken, zie [Tabel 1](#). De Hooge Raam is daarom ook geklassificeerd met het R14 KRW-type. In de volgende periode is te zien dat het verhang afneemt. Na 520 dagen is het verhang gehalveerd tot 0.9 m/km. Tot het einde van het experiment blijft het verhang rond deze waarde. In het [Kader: Aanpassing lengteprofiel als gevolg van versmalting](#) in [Hoofdstuk 4](#) zal dieper ingegaan worden op de oorzaak van het afnemen van het verhang.

De dynamiek van de alternerende banken ([Figuur 13](#)) loopt parallel aan het verloop van het verhang ([Figuur 14](#)). De alternerende banken ontstonden onder atypische laaglandbeekcondities (verhang > 1 m/km). Toen het verhang afnam tot 0.9 m/km, verdween het regelmatige banken patroon. Het afnemen van het verhang en de stuweffecten hebben er voor gezorgd dat de waterstanden zijn gestegen. Dit resulteerde in een afname van de breedte-diepteverhouding. Het verhang en type sediment spelen een belangrijke rol in de vorming van alternerende banken. Het type sediment in de Hooge Raam (fijn zand, met een mediane korrelgrootte van 218 µm) is typisch voor laaglandbekken, terwijl het uiteindelijke verhang tegen de bovenlimiet van verhangen die regelmatig voorkomen in laaglandbekken (zie ook [Tabel 1](#)). Hieruit valt op te maken dat het niet waarschijnlijk is dat alternerende banken in laaglandbekken vaak zullen ontstaan. Het is onwaarschijnlijk dat autogene processen, die ten grondslag liggen aan alternerende banken, tot kronkelende laaglandbekken zullen leiden.

Fig 14 TEMPORELE ONTWIKKELING VAN HET BODEMVERHANG IN DE HOOGE RAAM
Dit figuur is gebaseerd op Figuur 9 in Ekhout et al. (2013b).



H4 LENGTEPROFIEL



Het lengteprofiel is het bodemprofiel van een rivier, gezien in stroomafwaartse richting. Vaak wordt van verschillende dwarsprofielen de gemiddelde bodemhoogte bepaald en afgebeeld in de langsrichting. Op basis van zo'n figuur kan het bodemverhang van de rivier worden bepaald. Indien meerdere metingen in de tijd zijn verricht, kunnen veranderingen in beeld gebracht worden.

In de jaren zeventig is een aantal standaardwerken gepubliceerd die de morfologische aanpassing van het lengteprofiel eenvoudig hebben gekarakteriseerd. Schumm (1977) heeft een rivier afgebeeld als een lopende band, als metafoor voor het continue transport van sediment ([Figuur 15](#)). Een rivier is op te delen in 3 zones: een zone van erosie, een zone waar transport plaatsvindt en een zone van depositie. De balans van het systeem houdt verband met het type sediment (bijvoorbeeld zand of grind) en de dimensies van de rivier, met name breedte, diepte en verhang. Onder natuurlijk omstandigheden zorgt de toename van de breedte en diepte in de benedenstroomse richting en een continue aanvoer van sediment voor een dynamisch morfologisch evenwicht. Dit wil zeggen dat de breedte en diepte geleidelijk in de lengterichting toenemen. De rivier is in balans, maar dat betekent niet dat er geen morfologische veranderingen plaatsvinden. Er is een dynamisch evenwicht, waarin er continu kleinschalige, morfologische veranderingen plaatsvinden. De toepassing van dit concept op laaglandbekken ligt met name bij het besef dat er continu sedimenttransport plaatsvindt van bovenstroms naar benedenstroms, het dynamische aspect van het evenwicht. Laaglandbekken hebben geen uitgesproken zone van erosie en depositie. Erosie en depositie vindt langs de hele lengte van de beek plaats.

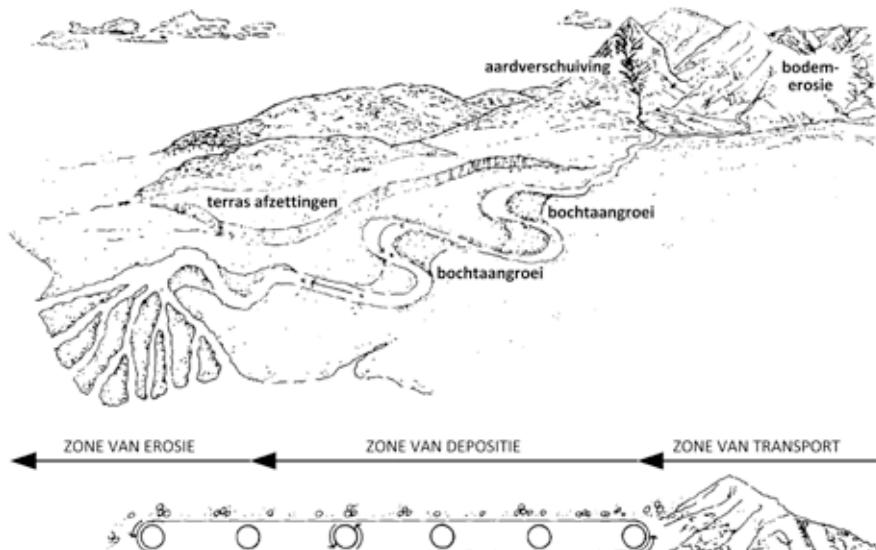
Wanneer een rivier niet in balans is, vinden er continu veranderingen van het lengteprofiel plaats. Klassieke voorbeelden zijn verbredingen/versmallingen en het stijgen/dalen van het waterpeil bij de monding van een rivier. Deze veranderingen hebben stuweffecten tot gevolg. In bovenstroomse richting zal het waterpeil zich aanpassen aan een nieuwe situatie. Uiteindelijk leidt dit tot een aanpassing van het lengteprofiel.

Dit soort aanpassingen komen vaak voor in Nederlandse laaglandbekken, zie ook [Kader: Aanpassing lengteprofiel als gevolg van versmalling](#). Veel voorkomende versmallingen zijn bruggen en oude stuwen. Dit heeft tot gevolg dat bovenstroms van, bijvoorbeeld, een brug de waterstand zal stijgen, als gevolg van de stuweffecten.

Hierdoor neemt de stroomsnelheid af en zal bovenstrooms van de brug sedimentatie plaatsvinden. Dit leidt uiteindelijk tot een lokale afname van het verhang. Een ander veelvoorkomende situatie is dat een hermeanderingstraject uitmondt in de oude gekanaliseerde, overgedimensioneerde loop. De stroomsnelheden in de oude gekanaliseerde loop zijn, vanwege de grotere dimensies, vaak laag in vergelijking met de hermeanderde beek. Dit leidt uiteindelijk tot sedimentatie van de gekanaliseerde loop. Het is dus belangrijk om een beeld te hebben van lokale verbredingen en versmallingen die invloed kunnen hebben op het lokale lengteprofiel. Het gaat daarbij niet alleen om verbredingen en versmallingen van het dwarsprofiel, maar óók van de inundatiezone.

Fig 15 EROSIE, TRANSPORT EN DEPOSITIE

De drie zones (*erosie, transport en depositie*) die in natuurlijke rivieren voorkomt (Schumm, 1977).



In [Figuur 15](#) is te zien dat de lopende band onafgebroken van bovenstrooms naar benedenstrooms loopt. In Nederlandse laaglandbekken zijn in het verleden op grote schaal stuwen gebouwd, ten behoeve van het reguleren van de waterstanden.

Eén van de maatregelen bij beekherstel is het verwijderen van stuwen. Toch komt het geregeld voor dat bijvoorbeeld bovenstroms van het hermeanderingsproject een stuw blijft staan, vaak omdat bovenstroms de beek nog in het oude geganaliseerde profiel ligt. Dit heeft gevolgen voor de het transport van sediment. In zo'n geval wordt de lopende band van [Figuur 15](#) in tweeën gesplitst. Hierdoor ontstaat er bovenstroms van de stuw een zone van depositie en benedenstroms een zone van erosie (zie ook [Kader: Aanpassing lengteprofiel als gevolg van een stuw](#)). Wanneer een hermeanderingstraject wordt aangelegd direct benedenstroms van een stuw, zal dit vaak leiden tot een verlaging van het verhang, als gevolg van insnijding van de beekbodem benedenstroms van de stuw.

Zoals hierboven beschreven zijn er verschillende redenen te noemen waarom het lengteprofiel zich kan aanpassen. De snelheid waarmee dit gebeurt is van belang. Uit de twee voorbeelden die in de kaders te zien zijn, valt op te maken dat het aanpassen van het lengteprofiel in een tijdsspanne van 1-2 jaar kan plaatsvinden. Via een eenvoudige berekening is vast te stellen dat deze orde van grootte typisch is voor Nederlandse laaglandbekken (zie [Kader: Morfologische tijdschaal](#)). Dit is een zeer relevant gegeven voor Nederlandse laaglandbekken. Boven- en benedenstroms van herstelde beektrajecten worden nog steeds bestaande stuwen gehandhaafd. Daarnaast zorgen bruggen en andere constructies voor lokale versmallingen van het dwarsprofiel. De stuwen en versmallingen zorgen voor een onevenwichtige situatie, waarin het zeer waarschijnlijk is dat de aangelegde beekbodem zich in de eerste jaren na aanleg zal gaan aanpassen.

KADER

AANPASSING LENGTEPROFIEL ALS GEVOLG VAN VERSMALLING

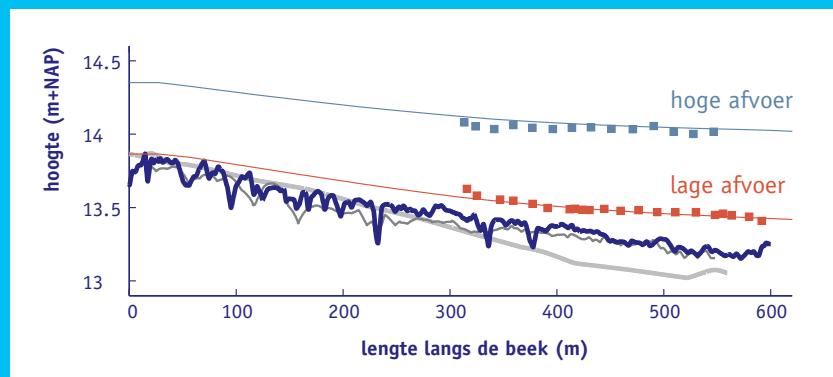
In de Hooge Raam heeft een benedenstroms gelegen versmalling voor aanpassing van het lengteprofiel gezorgd. [Figuur 8](#) laat zien dat benedenstroms van het brede experimentele traject een kronkelend, smal hermeanderingstraject is aangelegd. Dit heeft stuweffecten tot gevolg gehad in het bovenstroms gelegen experimentele traject. In [Figuur 16](#) zijn twee voorbeelden van verhanglijnen van de waterstand te zien, voor respectievelijk een laagwater en een hoogwater situatie. In de laagwater situatie is te zien dat het waterstandsverhang in het bovenstroomse deel (tot 400 meter) gelijk is aan het bodemprofiel. Benedenstroms hiervan (400-600 meter) neemt het waterstandsverhang af. Dit is nog duidelijker zichtbaar in de hoogwater situatie. Het waterstandsverhang was bijna horizontaal, in vergelij-

king met het steile bodemverhang. Dit is typisch een geval van opstuwing waarbij de waterdiepte in benedenstroomse richting toeneemt (M1-curve), en veroorzaakt wordt door benedenstroomse versmallingen.

De M1-curve leidt tot hogere waterstanden richting de versmalling, wat vervolgens leidt tot lagere stroomsnelheden. Het gevolg hiervan is dat sediment kan worden afgezet, als de stroomsnelheden te laag worden om sediment te transporteren, zoals in dit voorbeeld het geval is geweest. Uiteindelijk heeft dit tot een verlaging van het bodemverhang geleid. Initieel was het bodemverhang 1.8 m/km. Anderhalf jaar na aanleg was het bodemverhang afgangen tot 0.9 m/km, een halvering van het initiële verhang. In de periode tot het einde van de meetperiode (nogmaals anderhalf jaar) is het verhang nogenoeg gelijk gebleven. Op de schaal van het beekherstelproject heeft zich een nieuw dynamisch morfologisch evenwicht ingesteld.

Fig 16 VOORBEELD AANPASSING ALS GEVOLG VAN EEN VERSMALLING

Dit figuur is gebaseerd op Figuur 9 in Ekhout et al. (2013b).



KADER AANPASSING LENGTEPROFIEL ALS GEVOLG VAN EEN STUW

Het lengteprofiel kan ook worden beïnvloed door de aanwezigheid van een stuwdam. Bovenstrooms van het hermeanderingsproject in de Lunterse beek was een stuwdam aanwezig. [Figuur 17](#) laat de ontwikkeling van het lengteprofiel van de Lunterse beek zien. Direct benedenstrooms van de stuwdam is de bodemhoogte over een lengte van 70 meter tot 40 cm onder de ini-

tiële bodemhoogte ingesneden. Dit lijkt weinig, maar met een aangelegde diepte van ongeveer 40 cm, betekent dit dat de beek in een tijdsbestek van één jaar 2 keer zo diep is geworden.

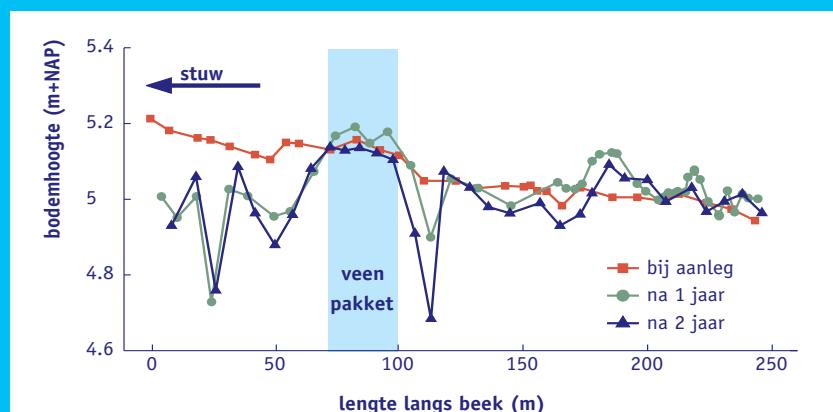
Dit is een typisch effect van het ontbreken van bovenstroomse sedimentaanvoer, als gevolg van een stuwdam. De lopende band, zoals afgebeeld in [Figuur 15](#), is onderbroken. Direct benedenstroms van de stuwdam is een nieuwe zone van erosie ontstaan. In [Figuur 17](#) is nog een diepe kuil te zien, rond 115 meter vanaf het bovenstroomse deel van het studiegebied. Dit is wederom het gevolg van het onderbreken van sedimentaanvoer. Tussen 70 en 100 meter bestaat het bodemmateriaal niet uit zand, maar uit veen. Dit veenpakket is moeilijk erodeerbaar. Zonder bovenstroomse sedimentaanvoer neemt het sedimenttransport in deze zone drastisch af. Vanwege de hoge erosieresistentie wordt er geen nieuw sediment opgepikt. Dit leidt direct benedenstroms tot erosie. Vandaar het ontstaan van een diepe kuil rond 115 meter.

[Figuur 17](#) laat ook duidelijk zien dat de aanpassing van het lengteprofiel zich voornamelijk in het eerste jaar heeft afgespeeld. Afgezien van de diepe kuil benedenstroms van het veenpakket, zijn de verschillen tussen de groene en zwarte lijn erg klein. De snelheid van aanpassing is de focus van het volgende kader.

Fig 17

VOORBEELD VAN EEN LENGTEPROFIELAANPASSING

Voorbeeld van een lengteprofielaanpassing als gevolg van het afvangen van sediment door een bovenstroomse stuwdam. Dit figuur is gebaseerd op [Figuur 3](#) in Eekhout et al. (2014a).



KADER MORFOLOGISCHE TIJDSCHAAL

De morfologische tijdschaal (de Vries, 1975) is een karakteristieke tijdschaal waarmee het bodemverhang zich aanpast aan een (hydrologische) verandering. Het concept morfologische tijdschaal kan worden geïllustreerd aan de hand van een rivier die in een meer uitmondt (zie [Figuur 18](#)). Het waterpeil in het meer wordt verlaagd met een diepte $0.5 \Delta z_o$. Het waterpeil in de rivier zal zich hier vrijwel direct aan aanpassen. Het lengteprofiel van de rivierbodem zal zich ook gaan aanpassen aan het nieuwe waterstandsprofiel, door een afnemende waterdiepte in de benedenstroomse richting. De morfologische tijdschaal geeft aan hoe lang het duurt voordat de bodem van de rivier, op afstand L vanaf het meer, zich heeft ingesneden over een diepte van 50% van de verlaging van het meerpeil ($0.5 \Delta z_o$). De morfologische tijdschaal wordt als volgt berekend:

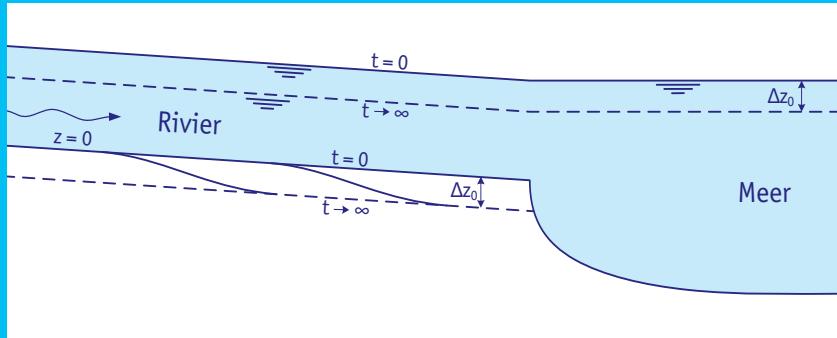
$$T = \frac{(1 - e)3L^2Bi_b}{bQ_s}$$

Waar T is de morfologische tijdschaal in jaren, e is de porositeit (fractie ruimte tussen de zandkorrels) van het sediment ($e = 0.4$), L is de afstand waarover de berekening wordt uitgevoerd, B is de breedte van de rivier, i_b is het verhang, b is een exponent in een sedimenttransportformule ($b = 4$ voor zandrivieren) en Q_s is het jaarlijkse sedimenttransport. De formule is breder te interpreteren dan het geval van een waterloop die uitmondt in een meer. Om een soortgelijke berekening uit te voeren in het kader van hermeanderings-projecten is een waarde voor het jaarlijkse sedimenttransport nodig. Deze kan geschat worden met een sedimenttransportformule, bijvoorbeeld de sedimenttransportformule van Engelund & Hansen (1967):

$$q_s = \frac{0.05\bar{u}^2 h^{1.5} \left(\frac{\Delta \zeta}{\Delta x}\right)^{1.5}}{(s - 1)^2 \sqrt{g} d_{50}}$$

Hierin is \bar{u} de gemiddelde stroomsnelheid, h is de gemiddelde waterdiepte, $\frac{\Delta \zeta}{\Delta x}$ is het waterstandsverhang, s is de verhouding tussen de dichtheid van het sediment en de dichtheid van water ($s = 2.65$) en g is de valsnelheid (9.81 m/s^2). Met behulp van deze vergelijking wordt het sedimenttransport bepaald, per strekkende meter breedte van de rivier, en per seconde. Om het jaarlijkse sedimenttransport te bepalen moet q_s vermenigvuldigd worden met het aantal seconden per jaar ($365 \cdot 24 \cdot 3600$) en de breedte van de rivier B .

Fig 18 MORFOLOGISCHE TIJDSCHAAL
(naar de Vries, 1975).



De morfologische tijdschaal is bepaald voor elk van de drie hermeanderingsprojecten. Op basis van de waterstands- en afvoergegevens is de stroomsnelheid bepaald. Eerst is het doorstroomoppervlak bepaald met behulp van de waterstandsgegevens en de dwarsdoorsnede van de beek. Vervolgens is de afvoer gedeeld door het doorstroomoppervlak. Het waterstandsverhang is bepaald op basis van gemeten waterstandsverhangen, die tijdens de morfologische metingen zijn ingemeten. Het jaarlijkse sedimenttransport is berekend op basis van de daggemiddelde stroomsnelheden.

De morfologische tijdschaal T is te interpreteren als een karakteristieke responsperiode van de beekbodem, op een karakteristieke afstand L van de ingreep in de beek. Deze karakteristieke lengtemaat, waarover het waterstandsverhang zich min of meer aanpast, is vastgesteld op 1 km. Deze lengtemaat komt overeen met de lengte van een gemiddeld beekhersteltraject in Nederland. Voor de Tungelroyse beek is deze lengte te kort om te kunnen voldoen aan de volgende voorwaarde voor geldigheid van de achterliggende theorie:

$$L > \frac{3h}{i_b}$$

De resultaten van de berekening van de morfologische tijdschaal zullen daarom worden geïnterpreteerd als een indicatie voor de tijdschaal voor laaglandbekken in het algemeen.

Tabel 4 geeft een indicatie voor het jaarlijkse sedimenttransport en de morfologische tijdschaal voor de drie hermeanderingsprojecten. De morfologische tijdschaal van de drie beken hebben is minder dan 10 jaar en hebben dezelfde orde grootte zoals geobserveerd in de Hooge Raam ([Kader: Aanpassing als gevolg van versmalling](#)) en Lunterse beek ([Kader: Aanpassing als gevolg van een stuwdam](#)). Dit voorbeeld en de veldgegevens in de Hooge Raam en Lunterse beek laten zien dat aanpassing van het lengteprofiel in nieuw aangelegde laaglandbeken binnen enkele jaren na aanleg zal plaatsvinden.

Tabel 4 MORFOLOGISCHE TIJDSCHAAL VAN DE DRIE HERMEANDERINGSPROJECTEN

	HAGMOLENBEEK	LUNTERSE BEEK	TUNGELROYSE BEEK
Sedimenttransport (m^3/jaar)	123	332	299
Morfologische tijdschaal (jaar)	5,1	9,2	1,6

H5 OEVEREROSIE



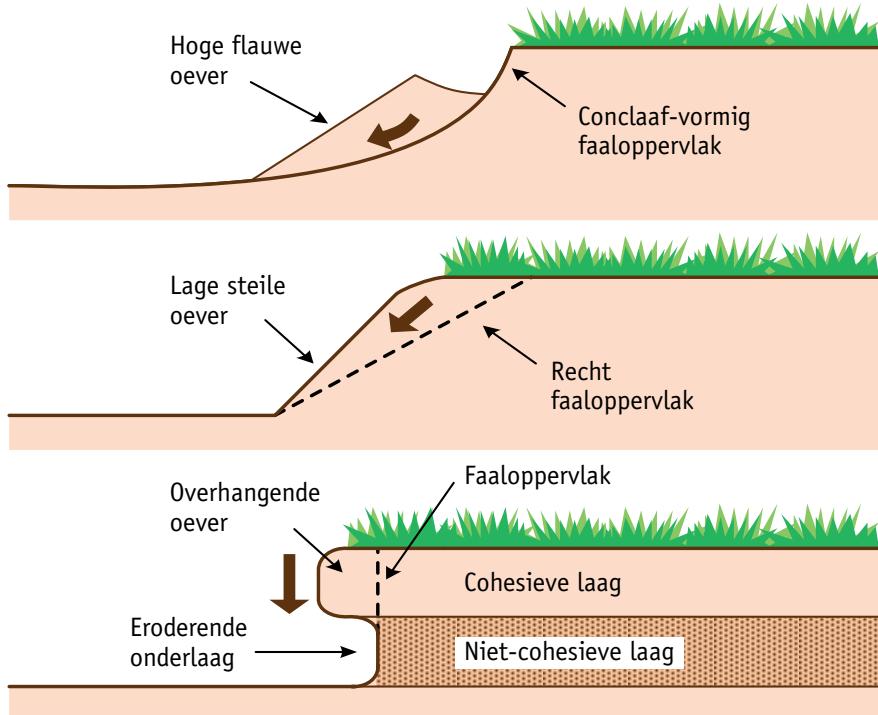
Oevererosie is de meest in het oog springende morfologische verandering in meanderende rivieren. Oevererosie is een proces dat zich, in tegenstelling tot de aanpassing van het lengteprofiel, op relatief korte tijdschalen afspeelt. Oevererosie vindt met name plaats in bochten. Waar in de buitenbocht erosie plaatsvindt (oevererosie) en in de binnenbocht sedimentatie (bochtaangroei). Oevererosie wordt vaak ten onrechte geïnterpreteerd als meandering, echter, het is slechts een onderdeel van het meanderproces. Op een langere tijdschaal leiden oevererosie en bochtaangroei tot een toename van de sinuositeit (de verhouding tussen de beeklengte en valleilengte).

Oevererosie kan dramatische gevolgen hebben. Aanpalende percelen kunnen bijvoorbeeld worden bedreigd wanneer actieve oevererosie plaatsvindt. Daarnaast kunnen constructies, zoals wegen, bruggen en stuwen, bloot komen te liggen en vatbaar worden voor bijvoorbeeld inzakkingen. Het is daarom belangrijk om te weten of er veel oevererosie valt te verwachten in een nieuw aangelegde beek.

Oevererosie is een geofysisch proces. Er wordt een aantal faalmechanismen onderscheiden die het oevererosie proces beschrijven (Langendoen & Simon, 2008). De meest relevante faalmechanismen voor laaglandbekken zijn opgesomd in [Figuur 19](#). Er wordt onderscheid gemaakt tussen flauwe hoge oevers, lage steile oevers en overhangende oevers. Het type oevermateriaal speelt een belangrijke rol in het oevererosieproces. In het geval van de eerste twee faalmechanismen bestaat de oever in zijn geheel uit één soort materiaal, wat in het geval van Nederlandse laaglandbekken bijna altijd zand zal zijn. Het faalmechanisme is vooral afhankelijk van de vorm van de oever, en met name de helling van de oever. In het geval van het derde faalmechanisme bestaat de oever uit twee soorten materiaal, een cohesieve bovenlaag en een niet-cohesieve onderlaag.

De meest voorkomende ondergrond voor Nederlandse laaglandbekken is zand (zie [Figuur 4](#) en [Tabel 1](#)). De mediane korrelgroottes ([Tabel 2](#)) van de vier beekherstelprojecten komt zelfs overeen met fijn zand (125-250 µm). Dit type sediment is al bij lage stroomsnelheden in transport (zie [Kader: Temporele dynamiek](#)). Je zou verwachten dat hierdoor oevererosie eerder regel dan uitzondering zal zijn. Toch is dit niet het geval. Slechts in één van de onderzochte hermeanderingstrajecten heeft op grote schaal oevererosie plaatsgevonden (de Lunterse beek), terwijl in een ander traject slechts in één bocht oevererosie heeft plaatsgevonden (namelijk, de Hagemolenbeek).

Fig 19 FAALMECHANISMEN DIE IN NEDERLANDSE LAAGLANDBEKEN VOOR KUNNEN KOMEN
(FISRWG, 2001).



De oevererosie en gerelateerde morfologische processen die in de Lunterse beek plaatsvonden, concentreerden zich in de initiële periode na aanleg. Een mogelijk oorzaak hiervoor is een grote mate van sedimenttoevoer vanaf bovenstrooms. In het eerste jaar heeft het lengteprofiel zich aangepast (zie ook [Kader: Aanpassing lengteprofiel als gevolg van een stuwdam](#)), hierdoor is veel sediment vrij gekomen dat in het benedenstroomse deel van de beek is afgezet. Na deze initiële aanpassingsperiode van ongeveer acht maanden ontstond een meer gebalanceerde aan- en afvoer van sediment. Gedurende dezelfde periode heeft vegetatie zich in de inundatie- en oeverzone ontwikkeld. Dit heeft mogelijk oeverstabilisatie tot gevolg gehad ([Kader: Invloed van vegetatie op oevererosie](#)). Vervolgonderzoek is nodig om de invloed van pioniersvegetatie op oeverstabielheid vast te stellen. Op de lange

duur zal vegetatie de oevers van laaglandbekken mogelijk vastleggen. Visuele observaties van morfologisch onaangenameerde beken laten zien dat de oevers door bomen begroeid zijn. De meeste van deze bomen waren volgroeid. Daarnaast waren er weinig aanwijzingen van actieve oevererosie. Deze observaties suggereren dat bomen op de lange duur de beekoevers vastleggen en voorkomen dat oevererosie optreedt. Dit verklaart mogelijk ook het stabiele kronkelende bovenaanzicht van laaglandbekken vóór kanalisatie ([Kader: Historische ontwikkeling](#)).

Vegetatie zorgt voor oeverstabiliteit, maar kan onder bepaalde omstandigheden ervoor zorgen dat de impact van oevererosie groter wordt. Een voorbeeld hiervan is te zien in de Haghmolenbeek (zie [Kader: Cohesieve bovenlaag, niet-cohesieve onderlaag](#)). Stabilisatie van de oever door vegetatie wordt vooral veroorzaakt door het vasthouden van sediment door de wortels. Wanneer het netwerk van wortels een hoge dichtheid krijgt, dan ontstaat er een moeilijk erodeerbare bovenlaag, die vergelijkbaar is met de cohesieve bovenlaag zoals afgebeeld in het onderste paneel van [Figuur 19](#). Aangezien in de Nederlandse laaglandbekken voornamelijk fijn zand voorkomt, bestaat de onderlaag uit niet-cohesief materiaal. Dit leidt uiteindelijk tot de typische overhangende banken. Wanneer de onderlaag diep genoeg erodeert, zal de zwaartekracht ervoor zorgen dat de oever instort. Aangezien dit geen geleidelijk proces is, zoals bij de andere twee faalmechanismen, kan de impact groter zijn, vanwege de schoksgewijze aard van dit faalmechanisme.

In de Haghmolenbeek heeft oevererosie, zoals hierboven beschreven, maar op één locatie plaatsgevonden. De oevererosie is toe te schrijven aan lokale omstandigheden (een cohesieve bovenlaag en een niet-cohesieve onderlaag). In Hoofdstuk lieten we al zien dat in de Lunterse beek de ontwikkeling van het lengteprofiel is beïnvloed door de aanwezigheid van een veenpakket. De oevererosie is in de Lunterse beek ook beïnvloed door lokale omstandigheden. De hermeanderde beek doorkruist de oude gekanaliseerde loop op een aantal lokaties. Dit heeft lokaal voor morfodynamiek gezorgd (zie [Kader: Doorkruisen oude gedempte loop](#)). Deze voorbeelden kunnen samengevat worden door de term: heterogeniteit van de ondergrond. Dit wil zeggen dat lokale omstandigheden (bv. een veenpakket of ongeconsolideerd sediment) ervoor kunnen zorgen dat oevererosie toe- of afneemt. Dit kan zorgen voor een tijdelijke, lokale morfologische respons, die niet kan worden geïnterpreteerd als actieve meandering. Het is belangrijk om de heterogeniteit van de ondergrond in kaart te brengen, om de impact op de morfologie te kunnen bepalen.

KADER INVLOED VAN VEGETATIE OP OEVEREROSIE

De morfologische monitoring van de vier beekherstelprojecten was waarschijnlijk niet lang genoeg om vast te stellen of de pioniersvegetatie in staat is om de oevers vast te leggen. Gerelateerde processen spelen zich op een kleine schaal af, d.w.z. de schaal van één plant en zelfs kleiner, richting de schaal van individuele wortels. Ook al heeft dit onderzoek zich hier niet specifiek op gericht, toch zijn er aanwijzingen dat de invloed van pioniersvegetatie groot kan zijn. Door onderzoek in de Lunterse beek is getracht om hier meer inzicht in te krijgen. [Figuur 20](#) laat door middel van een opeenvolging van foto's zien waar en wanneer vegetatie in de inundatiezone is ontstaan. Op de eerste drie foto's (dag 0, 95 en 161) is geen vegetatie waar te nemen. Vanaf dag 231 ontstaat vegetatie in de inundatiezone. De grootste bedekking is te zien op dag 341. In de daaropvolgende periode nam de bedekking af.

Tabel 5 VEGETATIE SOORTEN IN DE INUNDATIEZONE

Karakteristieken van de meest dominante vegetatie soorten in de inundatiezone, met de naam, wetenschappelijke naam, gemiddelde bedekking (%), levensduur, groeiseizoen en wortellengte. De karakteristieken zijn verkregen van de website Wilde planten in Nederland en België (www.wilde-planten.nl).

	NAAM	WETENSCHAPPELIJKE NAAM	BEDEKKING (%)	LEVENSDUUR	GROEI-SEIZOEN	WORTEL-LENGTE
2012	Zomprus	<i>Juncus articulatus</i>	19	overblijvend	jun-sep	10-20 cm
	Greppelrus	<i>Juncus bufonius</i>	22	eenjarig	jun-sep	< 10 cm
2013	Zomprus	<i>Juncus articulatus</i>	14	overblijvend	jun-sep	10-20 cm
	Pitrus	<i>Juncus effusus</i>	14	overblijvend	jun-aug	< 100 cm
	Witte klaver	<i>Trifolium repens</i>	28	overblijvend	mei-okt	10-50 cm

Na aanleg van de Lunterse beek zijn twee vegetatieopnames gemaakt. Deze vegetatieopnames waren onderdeel van een parallelle studie naar de ontwikkeling van vegetatie. De vegetatieopnames zijn gemaakt in september 2012 en juli 2013. Langs drie dwarsprofielen zijn in vijf plots (elk met de afmetingen 25 x 50 cm; twee in de beek en drie in de inundatiezone)

Fig 20 ONTWIKKELING VAN VEGETATIE IN DE LUNTERSE BEEK

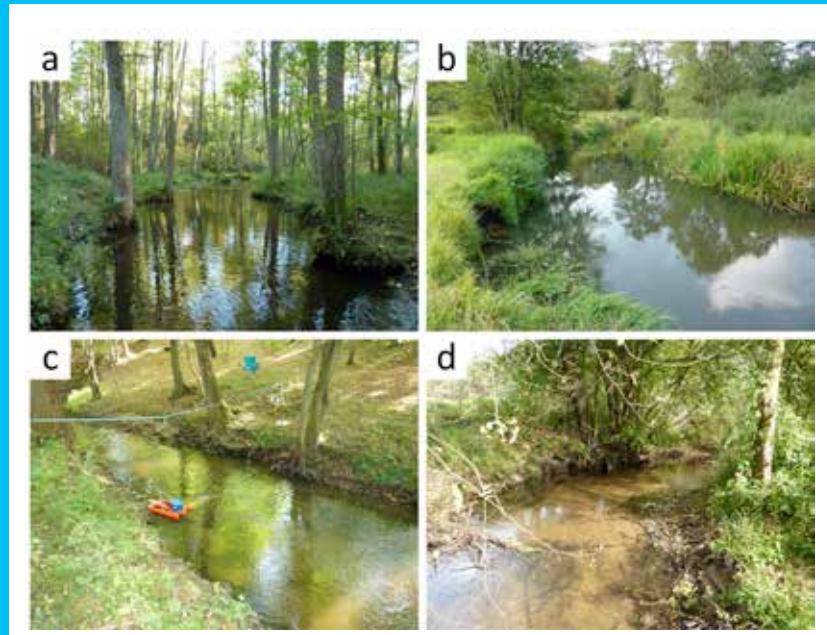
Twaalf opeenvolgende foto's van de ontwikkeling van vegetatie in de Lunterse beek. Dit figuur is gebaseerd op Figuur 8 in Eekhout et al. (2014).



schattingen gemaakt van de meest dominante soorten. De meest dominante soorten waren: Zomprus (*Juncus articulatus*), Greppelrus (*Juncus bufonius*), Pitrus (*Juncus effusus*) en Witte klaver (*Trifolium repens*). Deze vier soorten worden getypeerd als kruidige vegetatie. Kruidige vegetatie heeft in tegenstelling tot struikgewasachtige en houtige vegetatie een fijne wortelstructuur. Wanneer volledig ontwikkeld, is kruidige vegetatie in staat om

Fig 21 MORFOLOGISCH ONAANGETASTE LAAGLANDBEKEN

Fotos van morfologisch onaangetaste laaglandbekken in centraal Polen (regio ódzkie), met (a) Ga ($51^{\circ} 36' 16''$ N, $20^{\circ} 7' 57''$ O), (b) Grabia ($51^{\circ} 34' 1''$ N, $19^{\circ} 15' 46''$ O), (c) Korabiewka ($52^{\circ} 0' 58''$ N, $20^{\circ} 12' 50''$ O), en (d) S omianka ($51^{\circ} 29' 29''$ N, $20^{\circ} 14' 27''$ O).



de bovenste 30 cm van de bodem vast te leggen (Wynn *et al.*, 2004). De vier soorten hebben daarnaast nog een aantal andere overeenkomstige karakteristieken (Tabel 5). De groeiperiode is van juni t/m september, dit verklaart de maximum biomassa na 341 dagen (september 2012). Daarnaast zijn het overblijvende soorten. Ook dit is zichtbaar in [Figuur 20](#), aan het eind van de studieperiode, voordat het tweede groeiseizoen begon, was er nog steeds vegetatie aanwezig in de inundatiezone.

Over langere tijdschalen zal struikgewasachtige en houtige vegetatie zich ook in de oeverszone gaan ontwikkelen. In september 2011 is een bezoek gebracht aan vier morfologisch nagenoeg onaangetaste laaglandbekken in Polen ([Figuur 21](#)). Visuele observaties in deze vier laaglandbekken heeft geleerd dat de oevers gedomineerd worden door vegetatie. Hier-

onder valt kruidige vegetatie (panelen a en b) en houtige vegetatie (panelen a, c en d). De aanwezigheid van volgroeide bomen op de oevers suggereert dat laterale ontwikkeling gering is. Alleen in de Grabia (paneel a; linkszonder) is oevererosie geobserveerd, een voorbeeld van een overhangende oever (zie ook [Kader: Cohesieve bovenlaag, niet-cohesieve onderlaag](#)). De observaties in de Korabiewka en de Słomianka laten zien dat houtige vegetatie in staat is om de oever vast te leggen.

KADER COHESIEVE BOVENLAAG, NIET-COHESIEVE ONDERLAAG

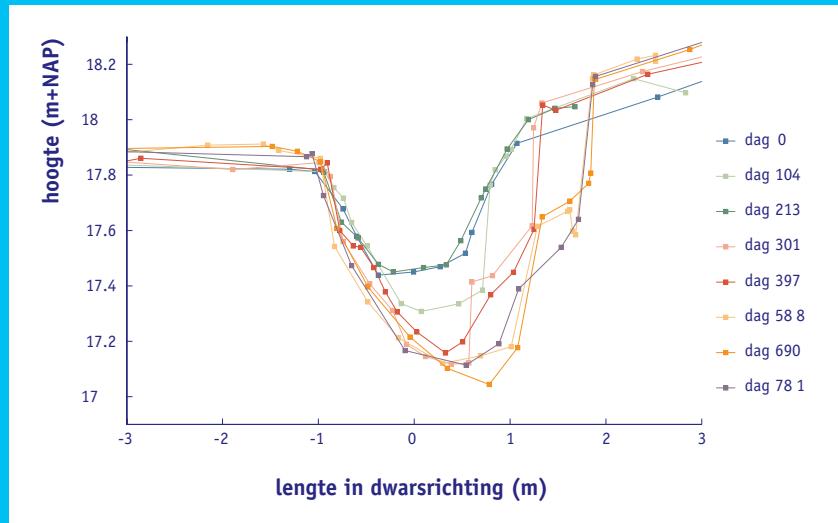
Binnen de oevererosieliteratuur wordt er onderscheid gemaakt tussen verschillende faalmechanismen ([Figuur 19](#)). Het derde faalmechanisme is een voorbeeld van overhangende oevers, een veel voorkomende oevervorm in Nederlandse laaglandbekken. In de Hagmolenbeek is dit faalmechanisme in detail geobserveerd. [Figuur 22](#) laat vijf opeenvolgende dwarsdoorsneden zien van één van de bochten in het onderzoeksgebied. Het gaat om de bocht bovenstrooms van de brug (zie [Figuur 5](#)). Daarnaast is een foto te zien van de buitenbocht. Op de foto is een kleurverschil te zien tussen de cohesieve bovenlaag (donker bruin) en zandige onderlaag (gelig). Waar bij cohesief materiaal vaak gedacht wordt aan bijvoorbeeld klei, is in dit geval een cohesieve laag ontstaan als gevolg van vegetatieontwikkeling. Er is een hecht netwerk van wortels ontstaan die ervoor zorgen dat de bovenste laag functioneert als een cohesieve laag.

De vijf opeenvolgende dwarsprofielen in het linker paneel laten duidelijk zien wat de gevolgen zijn voor de oevererosie wanneer de oever uit een cohesieve bovenlaag en niet-cohesieve onderlaag bestaat. De groene lijnen zijn de dwarsprofielen tijdens de eerste twee metingen. Vervolgens heeft er insnijding plaatsgevonden (de lichtgroene lijn). Het volgende profiel (de roze lijn) laat zien dat een deel van de oever is ingestort. De oever heeft een trapvormig profiel aangenomen. Dit wordt veroorzaakt door het cohesieve deel van de oever dat is ingestort.

Op de foto is te zien dat er vegetatie boven het water uitsteekt. Dit is de vegetatie die eerder op oever aanwezig was en die met het deel van de oever dat is ingestort zich nu op de bodem van de beek bevindt. In de volgende tijdstap (de rode lijn) is te zien dat het ingestorte deel van de oever is weggespoeld en er heeft zich een nieuw concaaf profiel gevormd. Dit proces heeft zich herhaald in de volgende twee tijdstappen (paarse en oranje lijnen). Uiteindelijk heeft dit ertoe geleid dat op deze specifieke locatie de breedte van de beek met 50% is toegenomen, binnen een tijdsbestek van anderhalf jaar.

Fig 22 TWEELAAGSE OEVER

Voorbeeld van erosie van een oever die uit twee lagen bestaat, een cohesieve bovenlaag en een niet-cohesieve/zandige onderlaag.



KADER DOORKRUISEN OUDE GEDEMPTE LOOP

De analyse van de Lunterse beek laat zien dat het doorkruisen van de oude gекanaliseerde loop gevolgen heeft voor de morfologische ontwikkeling. [Figuur 23](#) laat een luchtfoto zien van het onderzoeksgebied in de Lunterse beek. Met de witte lijnen is aangegeven waar de oude gекanaliseerde loop zich bevond, voordat het hermeanderingsproject was uitgevoerd. Vervolgens is de nieuwe waterloop gegraven en is de oude loop gedeeltelijk gedempt. Juist op de plekken waar de nieuwe loop de oude gекanaliseerde loop doorkruist is veel morfologische activiteit waar te nemen (zie rode ovalen). Binnen een half jaar na aanleg van dit hermeanderingsproject heeft een bochtafsnijding plaatsgevonden, aangegeven met de meest benedenstrooms gelegen rode ovaal in [Figuur 23](#). De locatie waar de bocht is afgesneden is precies op een plek waar de oude gекanaliseerde loop lag. Daarnaast speelde de aanpassing van het lengteprofiel ook een belangrijke rol in het proces dat tot de bochtafsnijding heeft geleid. Dus naast lokale oevererosie, kan het doorkruisen van de oude gекanaliseerde loop ook grotere veranderingen tot gevolg hebben van het bovenaanzicht van een beek.

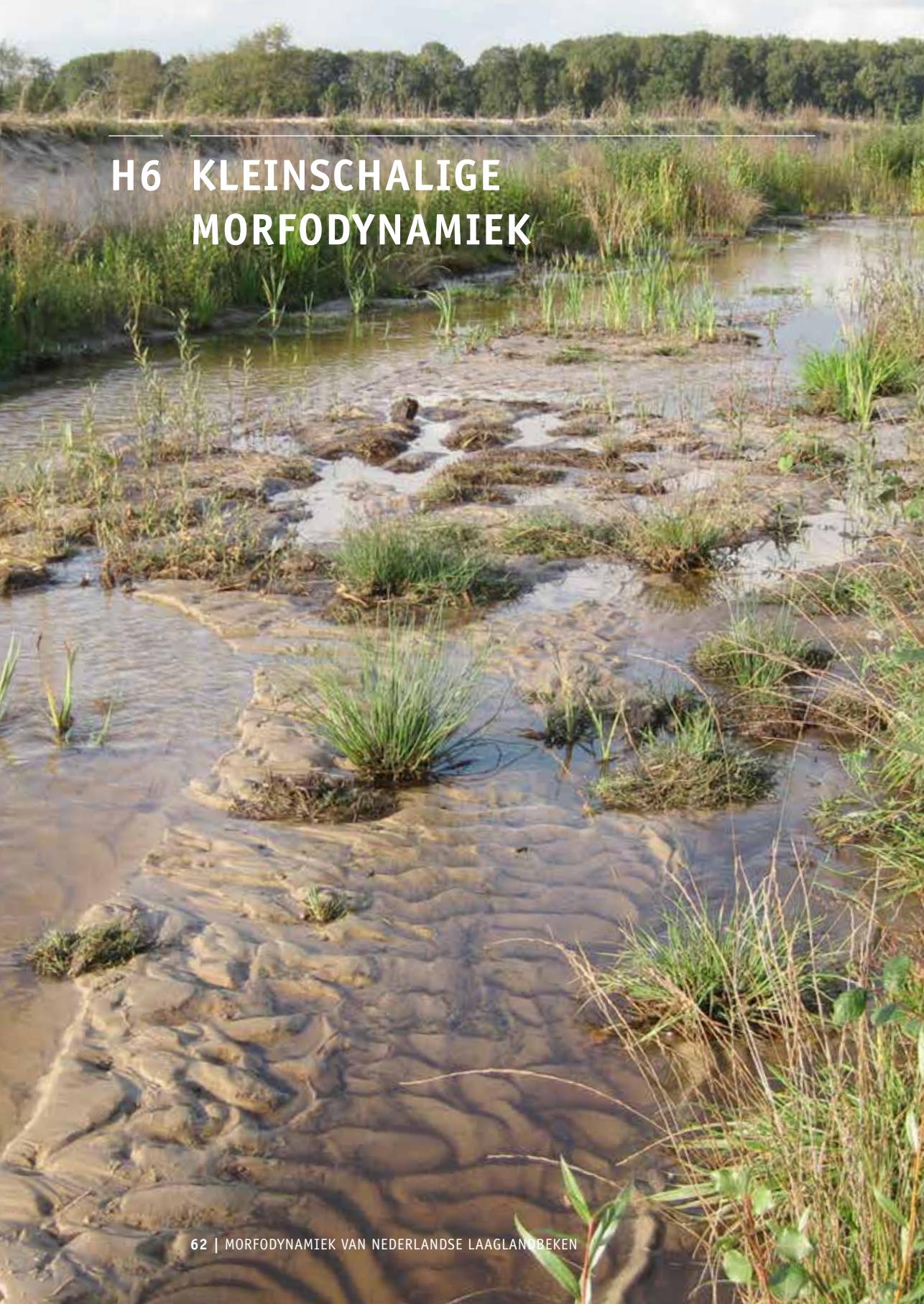
Oude gекanaliseerde waterlopen worden vaak opgevuld met sediment. Wanneer er voor het eerst water door de nieuwe waterloop stroomt, zal dit sediment nog niet geheel geconsolideerd zijn. De lokaties waar de nieuwe waterloop de oude doorkruist zijn vatbaar voor erosie. Het is daarom verstandig om het doorkruisen van de oude gedempte loop zoveel mogelijk te voorkomen.

Fig 23 ONDERZOEKSGBIED VAN DE LUNTERSE BEEK

Luchtfoto (gemaakt 188 dagen na aanleg) van het onderzoeksgebied van de Lunterse beek. De witte lijnen geven de lokatie van de oude gекanaliseerde loop aan. De rode ovalen geven aan waar in de inundatiezone erosie is opgetreden. Dit figuur is gebaseerd op Figuur 12 in Eekhout & Hoitink (2014).



H6 KLEINSCHALIGE MORFODYNAMIEK



In de voorgaande twee hoofdstukken lag de nadruk met name op de randvoorwaarden die grootschalige (ongewenste) morfodynamiek tegen kunnen gaan, zoals mogelijke aanpassingen van het lengteprofiel en het voorkomen van oevererosie. Dit zijn morfologische gevolgen die van invloed kunnen zijn op de het beheer en onderhoud van de beek.

De aquatische ecologie is gebaat bij kleinschalige morfologische veranderingen (Tolkamp, 1980). Veel diersoorten in beken zijn specifiek gebonden aan minerale substraten (habitat). Daarbinnen zijn soorten weer gekoppeld aan fijnere (zandige) en grovere (grindige) substraten. Organische substraten beïnvloeden de beekdieren door het bieden van voedsel en voedingsstoffen en van schuil- en aanhechtingsplaatsen. Lokale stromingsverschillen en -dynamiek zorgen ervoor dat dit kleinschalige mozaïekpatroon in minerale en organische substraten blijft bestaan en de zuurstofhuishouding hiervan is gewaarborgd.

Als grootschalige morfologische veranderingen uitblijven, zijn er dan nog wel genoeg kleinschalige morfologische veranderingen om een positief effect te hebben op de aquatische ecologie? Om dit te onderzoeken ligt de focus op de beekbodem. Op drie manieren is er onderzoek gedaan naar de kleinschalige morfodynamiek van beekbodems: (1) door analyse van de sedimentmonsters, (2) door het meten van de morfologie op kleine ruimtelijke schaal en (3) door analyse van stroomsnelheidsdynamiek.

Analyse van de sedimentmonsters ([Kader: Sedimentsamenstelling](#)) laat zien dat er geen systematische veranderingen optreden in de sedimentsamenstelling van herstelde beken. In de Lunterse beek, waar veel grootschalige morfologische veranderingen hebben plaatsgevonden (bochtafsnijding, oevererosie, aanpassing van het lengteprofiel), zijn de veranderingen in de sedimentsamenstelling zelfs het kleinste. In de andere twee beken (Hagmolenbeek en Tungelroyse beek) hebben meer veranderingen in sedimentsamenstelling plaatsgevonden, maar er is geen algemeen beeld naar voren gekomen.

Ondanks het gelijk blijven van de sedimentsamenstelling is er kleinschalige morfodynamiek. Uit de analyse van de morfologische metingen van de Hooge Raam en de Lunterse beek (zie [Kader: Detail morfodynamiek](#)) blijkt dat er op kleine temporele en ruimtelijke schaal toch veranderingen plaatsvinden. Er is te zien dat er

kuilen ontstaan, die op latere tijdstippen weer worden opgevuld met sediment. Daarnaast is geobserveerd dat er vanaf de bovenstroomse rand met pulsen sediment het onderzoeksgebied in is gekomen. Vaak is dit gerelateerd aan hoge afvoergebeurtenissen (zie [Bijlage A: Afvoertijdseries](#)), wanneer de stroomsnelheden hoog genoeg zijn om grote hoeveelheden sediment in suspensie te transporteren. Er zijn dus gedetailleerde morfologische metingen nodig om vast te stellen dat op kleine schaal morfologische veranderingen plaatsvinden, die van belang zijn voor ecologische ontwikkeling. Toch is vrij eenvoudig op een indirecte manier vast te stellen of het aannemelijk is dat er veranderingen hebben plaatsgevonden. Met behulp van waterstands- en afvoerdata kan de stroomsnelheid worden bepaald, wat is gebeurd voor de onderzochte hermeanderingsprojecten. Er is gebleken dat in alle drie hermeanderingsprojecten de stroomsnelheden het grootste deel van de tijd hoog genoeg waren om sediment te kunnen transporteren (zie [Kader: Temporele dynamiek](#)). Meer dan 81% van de tijd wordt de stroomsnelheid overschreden om sediment te kunnen transporteren.

Eén van de belangrijkste oorzaken is het type sediment dat in deze beken is aange troffen. In [Tabel 2](#) is te zien dat het sediment in alle vier beekherstelprojecten in de range van fijn zand te vinden zijn (125-250 µm). Fijn zand komt al in beweging bij lage stroomsnelheden (0.02-0.07 m/s). Bij deze lage stroomsnelheden zullen zandkorrels in beweging komen en zandribbels vormen. De gevormde zandribbels zijn relevant voor de macrofauna vanwege de vorm en de invloed op de kleine schaal stroomsnelheidsvariatie. Ook wordt er aan de lijzijde van zandribbels organisch materiaal afgezet, dat als voeding kan dienen voor aquatische ecologie. Er vinden bijna continu morfologische veranderingen plaats. Al dit soort kleinschalige veranderingen zijn waarschijnlijk groot genoeg om een positief effect te hebben op de aquatische ecologie.

KADER SEDIMENTSAMENSTELLING

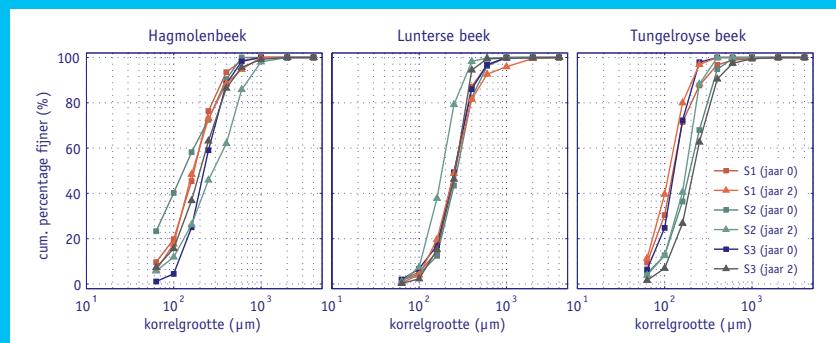
In de drie hermeanderingsprojecten zijn bij aanleg en na 2 jaar sedimentmonsters genomen van de beekbodem. De sedimentmonsters zijn op drie locaties langs de beek genomen (bovenstrooms, halverwege en benedenstrooms). In totaal zijn er dus zes sedimentmonsters per beek genomen en geanalyseerd. Door middel van een zeefanalyse is de sedimentsamenstelling bepaald. Eerst zijn de sedimentmonsters voor een periode van 24 uur gedroogd in een droogstoof bij 105° C. Daarna zijn de sedimentmonsters 10 minuten

gezeefd, waarbij acht verschillende maaswijdten van de zeven zijn gebruikt ($63, 100, 160, 250, 400, 600, 1000$ en $2000 \mu\text{m}$). Het sediment dat achterbleef op elke zeef is gewogen. Daarna is het cumulatieve percentage kleiner van elk van de acht fracties bepaald. [Figuur 24](#) laat de resultaten van alle 18 sedimentmonsters zien.

De kleinste veranderingen in sedimentsamenstelling zijn geobserveerd in de Lunterse beek. Alleen het sedimentmonster dat halverwege het onderzoeksgebied is genomen, 2 jaar na aanleg, wijkt af van de andere vijf sedimentmonsters. In de Hagmolenbeek en Tungelroyse beek liet de initiële sedimentsamenstelling langs de beek meer variatie zien dan in de Lunterse beek. In beide beken zijn alleen op 1 locatie (halverwege in de Hagmolenbeek en benedenstrooms in de Tungelroyse beek) grote veranderingen opgetreden.

Fig 24 SEDIMENTSAMENSTELLING

Sedimentsamenstelling in de Hagmolenbeek, Lunterse beek en Tungelroyse beek. Dit figuur is gebaseerd op Figuur 6 in Eekhout et al. (2014).



Een samenvatting van de resultaten is te zien in [Tabel 6](#). Deze tabel laat de mediane korrelgroottes van alle monsters zien en het effect van de verandering in sedimentsamenstelling op de totale samenstelling. Er is te zien dat verandering van de totale samenstelling met name wordt veroorzaakt door lokale veranderingen. Dat geldt voor alle drie de beken. Het feit dat er kleine, maar significante verschillen zijn gemeten wijst erop dat er sedimenttransport heeft plaatsgevonden. De veranderingen zijn helaas te klein om te kunnen worden gekoppeld aan fysisch processen.

Tabel 6 MEDIANE KORRELGROOTTE

Mediane korrelgrootte (μm) van de Hagemolenbeek, Lunterse beek en Tungelroyse beek.

	HAGMOLENBEEK		LUNTERSE BEEK		TUNGELROYSE BEEK	
Bovenstrooms (S1)	171	165	252	254	125	113
Halverwege (S2)	129	282	271	182	194	175
Benedenstrooms (S3)	222	200	253	259	128	214
ALLE MONSTERS	188	203	258	227	141	179

KADER DETAIL MORFODYNAMIEK

In twee beken is besloten om de morfologie met een hogere temporele en ruimtelijke resolutie te monitoren. In de Hooge Raam hebben zich alternerende banken gevormd. Dit zijn 3-dimensionale bodemvormen die een ontwikkeling doormaken in termen van banklengte, bankamplitude en bankmigratie (zie ook [Kader: Alternerende banken](#)). Vooral in de initiële periode nadat de banken zijn gevormd (acht maanden na aanleg) hebben de banken een grote morfodynamiek gekend. Al eerder is getoond dat de afname van het verhang de grootste morfologische verandering was in de Hooge Raam (zie [Kader: Aanpassing lengte-profiel als gevolg van versmalling](#)). Na anderhalf jaar was het verhang gehalveerd, waarna tot het eind van de meetperiode het verhang niet meer is veranderd.

In de Lunterse beek heeft drie maanden na aanleg een bochtafsnijding plaatsgevonden. Ook dit is een proces dat een 3-dimensionaal karakter heeft. In de periode hierna hebben zich met name in het benedenstroomse deel van het onderzoeksgebied grote morfologische veranderingen plaatsgevonden, zoals oevererosie en bochtaangroei. In het bovenstroomse deel van het onderzoeksgebied hebben deze processen niet plaatsgevonden. We richten ons hier daarom op de kleinschalige morfologische veranderingen die plaats hebben gevonden in de Hooge Raam, in de periode nadat het verhang was gehalveerd, en in de Lunterse beek in de bovenstroomse bocht, in de periode nadat de bochtafsnijding had plaatsgevonden.

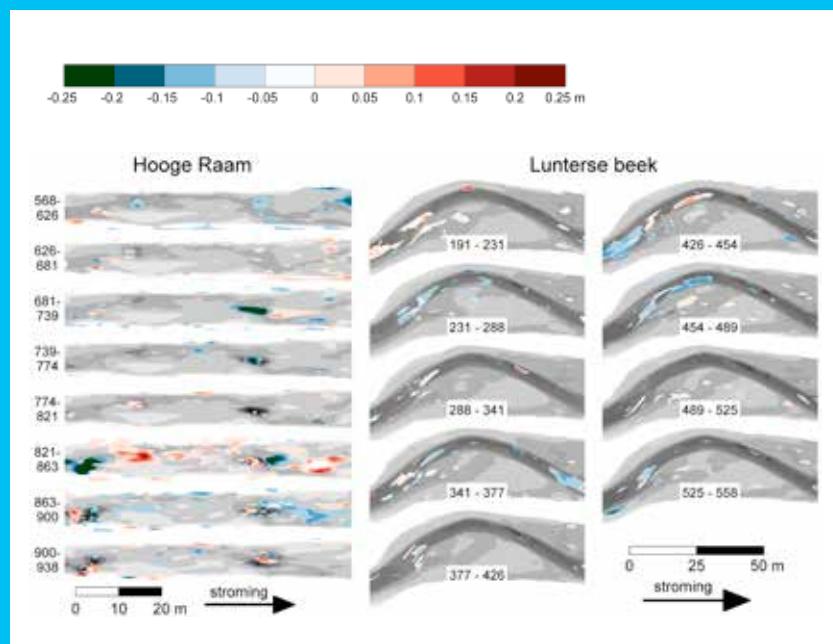
[Figuur 25](#) laat morfologische veranderingen in beide beken zien, met links de Hooge Raam en rechts de Lunterse beek. In het figuur zijn per periode tussen twee metingen de morfologische veranderingen aangegeven, waarbij rood en blauw respectievelijk sedimentatie en erosie aangeven. Onder de erosie/sedimentatie patronen is in grijs het hoogtemodel weer-

gegeven. Er is in beide beken te zien dat bij elke tijdstap veranderingen zijn opgetreden. In sommige perioden betreffen de veranderingen slechts enkele locaties, terwijl in andere perioden grootschalige veranderingen zijn waar te nemen. Dit is voor een groot deel toe te schrijven aan variatie in de afvoer.

In beide figuren is te zien dat er af en toe sedimentpulsen het studiegebied in zijn gekomen, die geassocieerd zijn aan hoge afvoerpieken (zie [Bijlage A: Afvoertijdseries](#)). Zo was dat het geval in de periode (821-863) in de Hooge Raam en in perioden (191-231) en (426-454) in de Lunterse beek. In de daarop volgende perioden is te zien dat de sedimentatiegebieden aan erosie onderhevig zijn geweest. Hieruit blijkt dat dit soort lokale effecten snel verdwijnen en dat er geen persistente sedimentatie van de beekbodem optreedt.

Fig 25 DETAIL MORFOLOGIE VAN DE HOOGE RAAM EN LUNTERSE BEEK

Met in grijs het hoogtemodel, blauw de erosie en rood de sedimentatie. Stroming is van links naar rechts.



KADER TEMPORELE DYNAMIEK

Naast het direct monitoren van verandering van de sedimentsamenstelling en de morfologie, is het mogelijk om op een indirecte manier te bepalen of de aanwezige stromingscondities resulteren in sedimenttransport. Daartoe zijn van de drie hermeanderingsprojecten de continu gemeten waterstands- en afvoerdata geanalyseerd. De oppervlakte-gemiddelde stroomsnelheid kan bepaald worden door waterstands- en afvoerdata te combineren. Naast deze tijdreeksen is ook een opname van het dwarsprofiel ter hoogte van het waterstandsmeetpunt nodig, zie [Figuur 5](#). Wanneer het dwarsprofiel bekend is, kan het doorstroomoppervlak bepaald worden aan de hand van de waterstandsdata. De oppervlakte-gemiddelde stroomsnelheid wordt verkregen door de afvoer te delen door het doorstroomoppervlak:

$$u(t) = \frac{Q(t)}{A(t)}$$

Waar $u(t)$ de oppervlakte-gemiddelde stroomsnelheid is, $Q(t)$ de afvoer en $A(t)$ het doorstroomoppervlak, alle drie tijdsafhankelijk. Vervolgens kan met behulp van de tijdserie van de waterdiepte de dimensioze bodemschuifspanning (Shields parameter) bepaald worden. De Shields parameter is een maat voor de sleepkracht van de stroming langs het bodemmateriaal, per eenheid van oppervlakte:

$$\theta(t) = \frac{h(t) \frac{\Delta \zeta}{\Delta x}}{d_{50} s}$$

Waarbij $\theta(t)$ is de Shields parameter, $h(t)$ is de waterdiepte, $\frac{\Delta \zeta}{\Delta x}$ is het waterstandsverhang, d_{50} is de mediane korrelgrootte en s is de verhouding tussen de dichtheid van het sediment en de dichtheid van water ($s = 2.65$).

Sediment is in beweging wanneer een bepaalde kritische waarde voor de Shields parameter wordt overschreden. De kritische waarde voor de Shields parameter kan bepaald worden aan de hand van de mediane korrelgrootte (Van Rijn, 1993):

$$\theta_{cr} = 0.24D_*^{-1} \text{ bij } 1 < D_* \leq 4$$

$$\theta_{cr} = 0.14D_*^{-0.64} \text{ bij } 4 < D_* \leq 10$$

De korrelparameter D_* is gedefinieerd als:

$$D_* = \left[\frac{(s - 1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50}$$

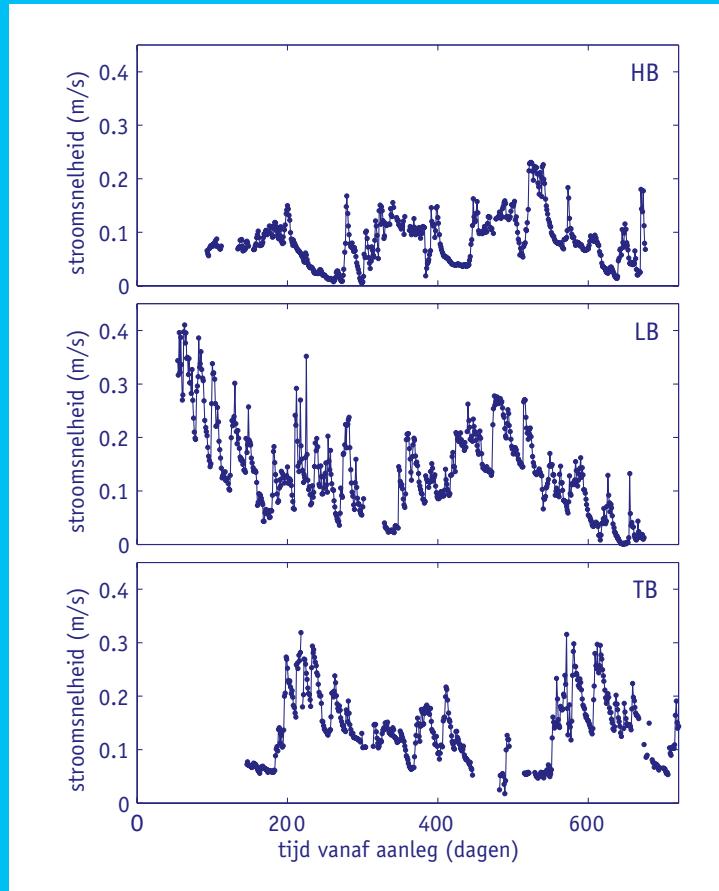
Waarbij $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ is de valversnelling en $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ is de kinematische viscositeit van water.

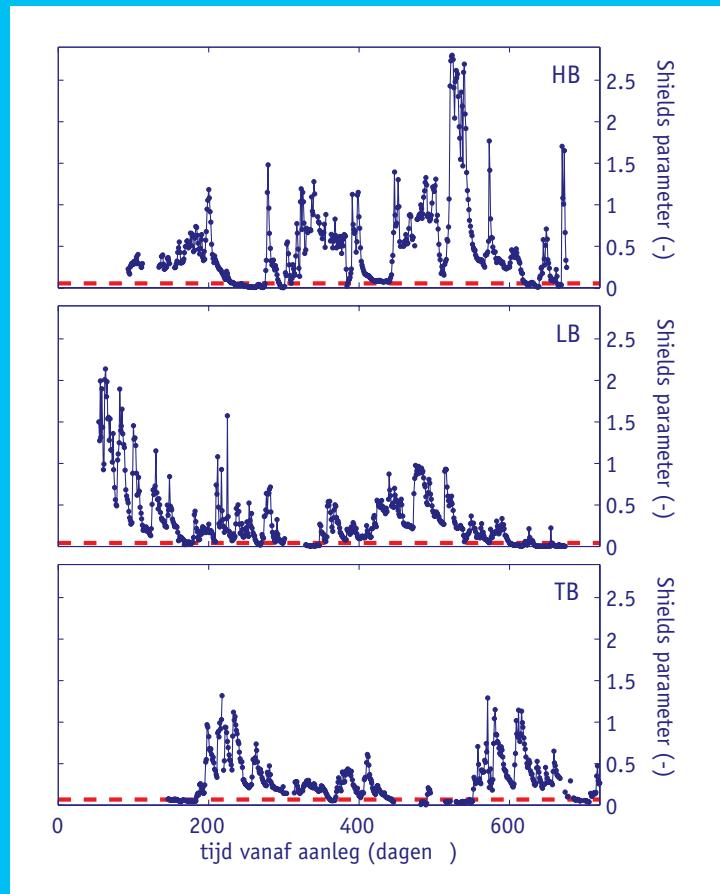
[Figuur 26](#) laat het verloop van de stroomsnelheid en de Shields parameter over de gehele meetperiode zien. Er is een aantal verschillen te zien in het stroomsnelheidsverloop van de drie beken. De Haghmolenbeek laat de meeste variatie over het jaar zien, waarbij in droge periodes de stroomsnelheid tot bijna 0 m/s daalt, terwijl in de natte periodes de stroomsnelheid tot boven de 0.3 m/s rijkt. De kleinste variatie is te zien in de Tungelroyse beek. De stroomsnelheid daalt in de Tungelroyse beek niet verder dan tot 0.08 m/s, terwijl de maximale stroomsnelheid niet hoger is dan 0.3 m/s. Deze variatie is voor een deel toe te schrijven aan de afvoerdynamiek. In [Tabel 2](#) was al eerder te zien dat de afvoervariatie het grootste is in de Haghmolenbeek en het laagst in de Tungelroyse beek. Hetzelfde patroon is terug te vinden in de variatie van de stroomsnelheden.

Deze variatie werkt ook door in de Shields parameter. In de figuren die de Shields parameter weergeven (rechts) is met een rode lijn de kritische waarde voor de Shields parameter aangegeven. Er is in alle drie de gevallen te zien dat het grootste deel van de tijd de kritische waarde voor de Shields parameter wordt overschreden. Het percentage ligt boven de 81% van de tijd.

Fig 26 HET TEMPORELE VERLOOP

Het temporele verloop van de gemiddelde stroomsnelheid (links) en Shields parameter (rechts) voor de Hagmolenbeek (HB), Lunterse beek (LB) en Tungelroyse beek (TB). In de figuren aan de rechterkant geeft de rode lijn de kritische waarde voor de Shields parameter aan.





H7 CONCLUSIES



In Nederland wordt vaak de term hermeandering gebruikt om aan te geven dat in een rechtgetrokken gekanaliseerde beek wordt vervangen door een kronkelende waterloop. De term hermeandering suggereert dat de herstelde beek de kenmerken zou moeten hebben van een actief meanderende rivier. Meandering is een proces waarbij oevererosie en bochtaangroei leiden tot een geleidelijke toename van de sinuositeit, tot het moment dat een bocht afsnijding de sinuositeit met een schok verkleint, waarna het proces opnieuw begint.

Kunnen Nederlandse laaglandbekken eigenlijk wel getypeerd worden als meanderende rivieren? Een aantal van de processen die ten grondslag liggen aan meandering, dat wil zeggen een toename van de sinuositeit door oevererosie en bochtaangroei en afname door bocht afsnijding, zijn in het veld geobserveerd. Deze processen hebben zich alleen op lokale schaal afgespeeld, waarbij specifieke, lokale omstandigheden een grote rol hebben gespeeld, zoals kwel en een groot verhang in het geval van het Gelderns-Nierskanaal en heterogeniteit van de ondergrond in het geval van de Lunterse beek. Alleen in het benedenstroomse deel van het Gelderns-Nierskanaal is actieve meandering over een traject van een groot aantal opeenvolgende meanderbochten geobserveerd, maar het Gelderns-Nierskanaal heeft niet de typische kenmerken van een laaglandbeek. In een uitzonderlijk steil experimenteel beekherstelproject zijn alternerende banken ontstaan, die worden geassocieerd met meanderinitiatie, maar de afname van het aangehechte bodemverhang, tot waarden vergelijkbaar met laaglandbekken, staakte het proces.

Uit historisch kaartmateriaal valt op te maken dat over een periode van tientallen jaren vóór kanalisatie bijna geen verandering van het bovenaanzicht is opgetreden. De beken hadden een kronkelend karakter, maar de processen die worden geassocieerd met meandering, zijn in die periode niet waargenomen. Dit levert de conclusie op dat Nederlandse laaglandbekken niet getypeerd kunnen worden als actief meanderende rivieren. Nederlandse laaglandbekken kunnen het best worden omschreven als kronkelend, of passief meanderend, zonder uitgesproken laterale ontwikkeling in de tijd. Het oorspronkelijke kronkelende bovenaanzicht van de meeste Nederlandse laaglandbekken is waarschijnlijk ontstaan onder invloed van externe invloeden, zoals lokale kwel en heterogeniteit van de ondergrond. De periode waarin de meeste laaglandbekken zijn ontstaan (laatste IJstijd), en de daarmee gepaard gaande klimatologische verschillen met deze tijd, kunnen een belangrijke rol hebben gespeeld in het ontstaan van het kronkelende patroon.

Vanwege het ontbreken van temporele laterale ontwikkeling (zoals oevererosie), lijkt er op het oog weinig te gebeuren in de Nederlandse laaglandbekken. Desalniettemin vinden er grootschalige morfologische veranderingen plaats in de herstelde beektrajecten. Deze veranderingen concentreren zich in de eerste paar jaar na aanleg en hebben een aanpassing van het lengteprofiel tot gevolg. Uit de veldwerkgegevens is op te maken dat de herstelde beken opzoek zijn naar een nieuw dynamisch morfologisch evenwicht. Een rivier is in dynamisch morfologisch evenwicht, wanneer bovenstroms sediment wordt aangevoerd, er een ononderbroken transport van sediment plaatsvindt en er benedenstroms een hoeveelheid sediment wordt afgezet die gelijk is aan de bovenstroms aanvoer. Langs de gehele waterloop dient het sedimenttransport gelijk te zijn aan de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren. Er vinden continu kleinschalige, morfologische veranderingen plaats. Het is wordt daarom een dynamisch evenwicht genoemd.

Er zijn verschillende redenen te noemen dat het in herstelde beektrajecten ontbreekt aan een dergelijk dynamisch morfologisch evenwicht. Een belangrijke oorzaak is het ontbreken aan longitudinale connectiviteit, als gevolg van stuwen, bruggen en andere constructies die invloed hebben op het sedimenttransport en opstuwing veroorzaken. Stuwen zorgen ervoor dat de constante toestroom van sediment wordt geblokkeerd. Versmallingen en verbredingen hebben stuweffecten tot gevolg, wat leidt tot een vergroting of een verlaging van de sedimenttransportcapaciteit, hierdoor zal het lengteprofiel zich aanpassen. Aangezien beekherstelprojecten vaak op kleine schaal worden uitgevoerd (enkele kilometers), zal de aanpassing van het lengteprofiel binnen de herstelde beektraject zich binnen enkele jaren voltrekken. Concluderend kan gesteld worden dat Nederlandse beeksystemen op de schaal van een beek morfologisch vrijwel inactief zijn, tenzij lokale, vaak door menselijke ingrepen veroorzaakte condities een tijdelijke aanpassing van de beekgeometrie teweeg brengen. Desalniettemin vind er vrijwel voortdurend sedimenttransport plaats, wat met name van belang is voor detail processen bij de bodem, die de randvoorwaarden vormen voor ecologische ontwikkeling.

Welke rol zou de morfologie moeten spelen binnen ecologisch herstel van Nederlandse laaglandbekken? De morfologie zou een faciliterende rol moeten spelen bij het verbeteren van de ecologische toestand van laaglandbekken. De morfologie moet de randvoorwaarden creëren voor de ecologie. De meerwaarde van hermeanndering is dat een kronkelende stroomdraad zorgt voor een toename van de ruim-

telijke variatie in stroomsnelheden. Een toename van de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden kan ook worden bewerkstelligd door meer structuur in de beek te brengen, bijvoorbeeld door het aanbrengen van dood hout. Het verlagen van het winterbed (inundatiezones) kunnen bijdragen aan het verlagen van de temporele stroomsnelheidsdynamiek. Het piekerige karakter van de afvoer zorgt incidenteel voor hoge stroomsnelheden, welke nadelig zijn voor de aanwezige beekorganismen. Het verspreiden van het water over een groot oppervlak zal bijdragen aan het verminderen van de hoge stroomsnelheden als gevolg van piekafvoeren. Echter, maatregelen zouden op een grotere schaal (stroomgebied) genomen moeten worden om tot de gewenste gedempte dynamiek te komen.

H8 AANBEVELINGEN VOOR DE PRAKTIJK



Er is geconcludeerd dat over het algemeen Nederlandse laaglandbekken een lage morfodynamiek hebben op de schaal van de beek. Toch is er een aantal omstandigheden waar in het ontwerpproces rekening mee gehouden dient te worden, om ongewenste morfodynamiek te voorkomen, rekening houdend met de gewenste dynamiek voor de aquatische ecologie.

Gebiedsanalyse

Voordat begonnen wordt met het ontwerp van het nieuwe beektracé wordt er vaak een gebiedsanalyse gemaakt. Deze gebiedsanalyse geeft inzicht in de hydrologische en ecologische omstandigheden in de situatie voor beekherstel. Het verdient aanbeveling ook de morfologische omstandigheden in kaart te brengen, om een totaal beeld te krijgen van het gebied. Dit kan een kortstondige, sterke morfologische aanpassing na aanleg van een herstelde beek voorkomen.

In dit rapport is vaak gebruik gemaakt van de mediane korrelgrootte. De mediane korrelgrootte is een belangrijke parameter op basis waarvan morfologische processen kunnen worden gekwantificeerd. Uit de analyse van de vier beekherstelprojecten blijkt dat de korrelgroottes binnen een bepaalde range vallen die overeenkomt met fijn zand. Dit betekent niet dat overal in Nederland de mediane korrelgrootte in deze range zal vallen (zie bijvoorbeeld bij het Gelderns-Nierskanaal). Een analyse van de sedimentsamenstelling van een aantal sedimentmonsters geeft inzicht in het type sediment en geeft input voor een aantal eenvoudige morfologische analyses uit te voeren, zoals het bepalen van de morfologische tijdschaal en de Shields parameter, zie [Het ontwerp](#).

Er is gebleken dat zowel de aanpassing van het lengteprofiel als de laterale ontwikkeling beïnvloed worden door lokale omstandigheden. Deze kunnen eenvoudig in kaart worden gebracht. Een goed startpunt is de bestaande gekanaliseerde loop, inclusief alle aanwezige constructies, zoals bruggen en stuwen. Vervolgens kan op basis van gebiedskennis en historische kaarten een inschatting worden gemaakt van de heterogeniteit van de ondergrond. Mocht deze informatie niet aanwezig zijn, dan kan door middel van grondboringen een inschatting worden gemaakt. Het gaat daarbij met name om de aanwezigheid van bijvoorbeeld veenpakketten en grindlagen, die erosieresistent zijn. Maar ook kwelplekken, die ervoor kunnen zorgen dat oevers worden verzwakt.

Het ontwerp

De hierboven beschreven gebiedsanalyse is invoer voor de ontwerpfase. De gebiedskaart kan gebruikt worden om aan te geven waar het nieuwe beektracé gegraven zou kunnen worden. Een historische kaart kan als inspiratie dienen bij het bepalen van de sinuositeit van het nieuwe beektracé, maar er is geen goede reden om het oude beektracé één-op-één over te nemen. Houdt rekening met de hierboven beschreven heterogeniteit van de ondergrond en voorkom, waar mogelijk, het doorkruisen van de oude gekanaliseerde loop.

Als op basis van een 1D-stromingsmodel (bv. SOBEK; Deltares, 2011) een beekgeometrie met inundatiezone is ontworpen, kan met behulp van hetzelfde stromingsmodel een inschatting gemaakt worden van de optredende Shields parameter. Vaak wordt de geometrie ontworpen aan de hand van een basis-(of gemiddelde), zomer- en winterafvoeren. De stroomsnelheden en de bodemruwheid uit het stromingsmodel en de mediane korrelgrootte kunnen gebruikt worden om de Shields parameter uit te rekenen (zie [Kader: Temporele dynamiek](#)). Dit geeft een indicatie van de morfologische gevolgen die te verwachten zijn op basis van verschillende ontwerpen. Indien de Shields parameter het grootste deel van het jaar lager is dan de kritische waarde voor de Shields parameter, dan kan dit tot het dichtslibben van de waterloop leiden. Hier kan het ontwerp op worden aangepast.

De gemiddelde stroomsnelheid en waterdiepte van het stromingsmodel, de nieuwe beekdimensies (breedte en verhang) en de mediane korrelgrootte kunnen ingezet worden om de morfologische tijdschaal uit te rekenen (zie [Kader: Morfologische tijdschaal](#)). Dit geeft een indruk van de snelheid waarmee morfologische aanpassingen van het lengteprofiel zullen plaatsvinden en een indicatie of veranderingen zullen plaatsvinden op tijdschalen van enkele jaren, tientallen jaren of zelfs eeuwen.

Monitoring

De frequentie waarmee de morfologie van Nederlandse laaglandbeeken in de huidige situatie wordt bemeten is één keer per 6 jaar, zie bijvoorbeeld van Dam *et al.* (2007). Tijdens deze metingen wordt er doorgaans om de 100 meter een dwarsraai ingemeten. Deze standaardmonitoring is bedoeld om de trend in morfologische ontwikkelingen in beeld te brengen. Echter, deze monitoring is niet toereikend om de initiële morfologische processen, die in een recentelijk aangelegde beek

spelen, in beeld te brengen. Er is gebleken dat er een initiële aanpassingsperiode bestaat die ongeveer 1-2 jaar in beslag neemt. Om de processen die daarbij een rol spelen in beeld te krijgen, is het aan te raden om een andere meetstrategie te hanteren. Er wordt geadviseerd om in de eerste 6 jaar na aanleg elk jaar een morfologische meting uit te voeren, d.w.z. het meten van tientallen dwarsprofielen over de volledige lengte van het beekherstelproject. Het is aan te raden om de afstand tussen de raaien te verkleinen tot 20 meter, en rond constructies (stuwen en bruggen) de resolutie nog verder te verhogen. Vanwege het beïnvloeden van het sedimenttransport en de gevolgen van stuweffecten, kunnen constructies een rol spelen in de morfologische ontwikkeling van het lengteprofiel.

Op basis van een meer uitgebreide dataset met beekbodemgegevens kan een gedetailleerd lengteprofiel verkregen worden, waar lokale veranderingen mee in beeld gebracht kunnen worden. Op basis van de gemeten veranderingen kan in een eerder stadium, waar nodig, bijgestuurd worden. Daarnaast verschaft deze monitoringsmethode inzicht in de processen die in de rapport zijn besproken. Dit rapport heeft zich met name gericht op vier beekherstelprojecten en is daarom beperkt in de gevolgen van een beperkte set externe invloeden op de morfodynamiek. In andere beken kunnen andere externe invloeden een rol spelen op de morfodynamiek. Door dit in detail te monitoren kan het inzicht in processen worden vergroot.

REFERENTIES



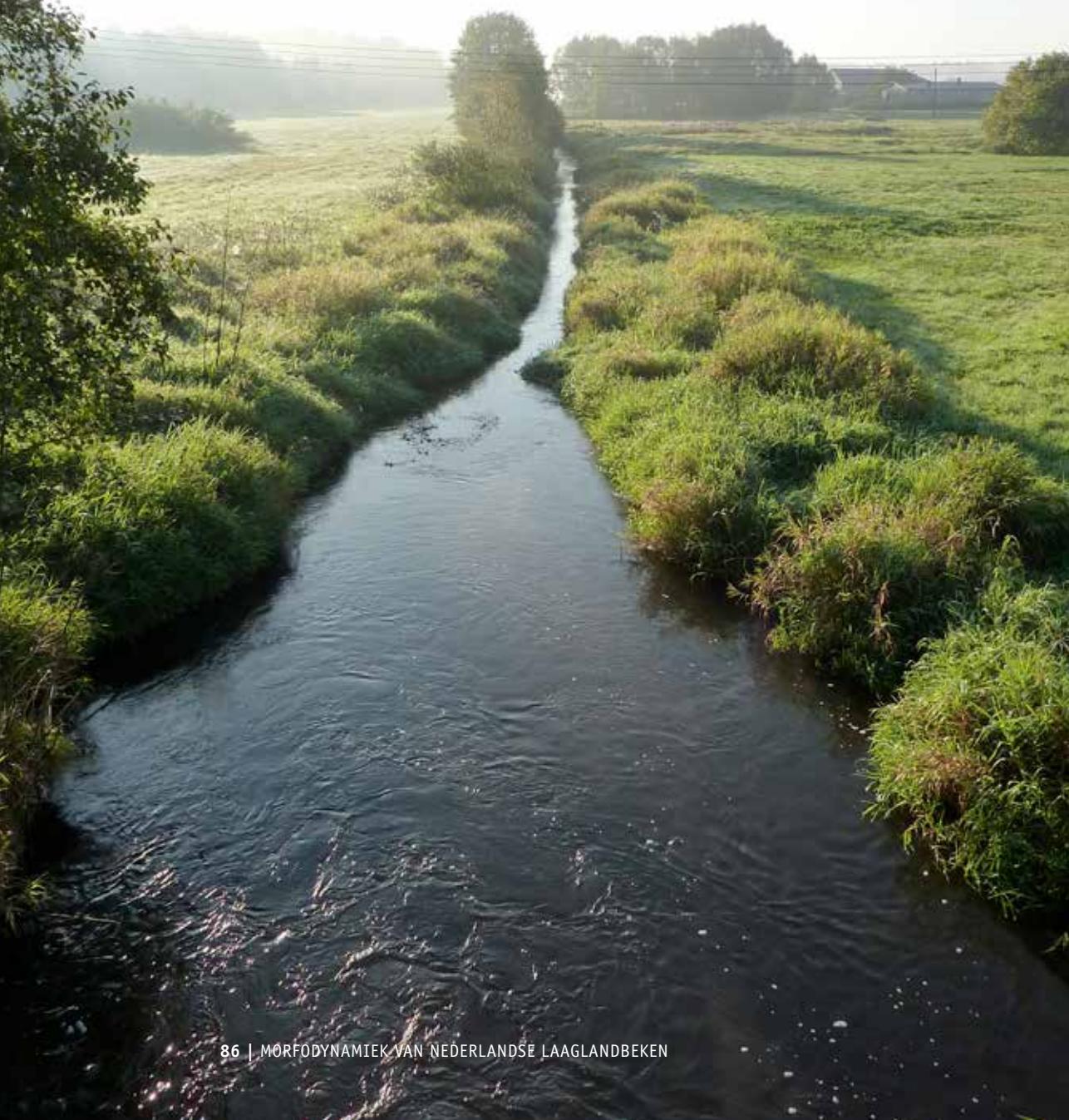
- Alterra (2006) Grondsoortenkaart 2006. <http://www.geodata.alterra.nl/Grondsoorten.htm> (bezocht op 13-01-2014).
- Baaijens, G.J. & Dauvillier, P. (2011) Stromend landschap: Vloeiweidenstelsels in Nederland. KNNV Uitgeverij, Zeist.
- Brookes, A. (1987) Restoring the Sinuosity of Artificially Straightened Stream Channels. *Environmental Geology and Water Sciences*. Volume 10, No. 1, pp 33-41.
- Brookes, A. & Long, A.J. (1990) Chart catchment morphological survey: Appraisal report and watercourse summaries. National Rivers Authority, Reading, Verenigd Koninkrijk.
- Council of the European Communities (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. Volume L327, pp 1-73.
- de Vries, M. (1975). A morphological time scale for rivers. In: Proc. 16th Congr. IAHR, São Paulo, Volume 2, pp. 17-23.
- De Jong P.J. (ed.) (1982) De Berkel beschouwd. Waterschap de Berkel, Zutphen.
- Deltares (2011) SOBEK 2.12 user manual. Deltares, Delft.
- Didderen K., Verdonschot, P.F.M. Knegtel, B. en Besse-Lototskaya, A. (2009). Enquête beek(dal)herstelprojecten 2004-2008. Evaluatie van beekherstel over de periode 1960-2008 en analyse van effecten van 9 voorbeeldprojecten. Alterra. Rapport 1858.
- Eekhout, J.P.C. (2014) Morphological Processes in Lowland Streams - Implications for Stream Restoration. Proefschrift Wageningen Universiteit. 178 pp.
- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F. & Makaske, B. (2013) Historical analysis indicates seepage control on initiation of meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volume 38, pp 888-897.
- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F., Makaske, B. & Talsma, M. (2013a) Het Geldernsch Nierskanaal: hoe een recht kanaal gaat meanderen als gevolg van kwel. H2O (online).
- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F. & Mosselman, E. (2013b) Alternate bar development in a straight sand-bed stream under a declining channel slope. *Water Resources Research*. Volume 49, pp 8357-8369.
- Eekhout, J.P.C. & Hoitink, A.J.F. (2014) Importance of backwater effects in the occurrence of a chute cutoff, ingediend bij *Journal of Geophysical Research – Earth Surface* (in review).
- Eekhout, J.P.C., Fraaije, R.G.A. & Hoitink, A.J.F. (2014) Morphodynamic regime change in a reconstructed lowland stream, *Earth Surface Dynamics* (in press).

- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F., de Brouwer, J.H.F. & Verdonschot, P.F.M. (2014a) Morphological assessment of reconstructed lowland streams in the Netherlands, ingediend bij Advances in Water Resources (in review).
- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F., Mosselman, E., Kits, M. & Talsma, M. (2014b) Veldexperiment in de Hooge Raam: winst voor beekherstel én wetenschap. Stromingen. Volume 20, nummer 2, pp 5-16.
- Eekhout, J.P.C., Hoitink, A.J.F., Huisng, C. & Talsma, M. (2014c) Aanpassing van de morfologie na beekherstel: Casestudie Lunterse beek. H2O (online).
- Elbersen, J.W.H., Verdonschot, P.F.M., Roels, B. & Hartholt, J.G. (2003) Definitiestudie KaderRichtlijn Water. Alterra rapport 669.
- Engelund, F. and Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- FISRWG (2001) Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. NCFS rapport.
- Higler L.W.G., Beije H.M. & Van der Hoek W.F. (1995). Ecosysteemvisie Beken en Beekdalen. IJN/IKC-NBLF, Leersum-Wageningen.
- Iversen, T.M. Kronvang, B. Madsen, B.L., Markmann, P. & Nielsen, M. (1993) Re-establishment of Danish streams: restoration and maintenance measures. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. Volume 3, pp 73-92.
- Kuennen, P.H. (1944) Gedenkboek van Dr. Ir. P. Tesch. Geologische Serie XIV, Verhandelingen van het Geologisch-Mijnbouwkundig Genootschap voor Nederland en koloniën. Hoofdstuk De Drentsche riviertjes en het meandervraagstuk, pp 313–336.
- Langendoen, E.J. & Simon, A. (2008) Modeling the Evolution of Incised Streams. II: Streambank Erosion. Journal of Hydraulic Engineering. Volume 134, pp 905-915.
- Leopold, L.B. & Wolman, M.G. (1957) River Channel Patterns - Braided, Meandering and Straight. US Geological Survey Professional Paper 282-B.
- Lindow, N., Evans, R.O. & Bass, K. (2007) Channel evolution and sediment transport in a restored sand bed stream. In: Restoring Our Natural Habitat - Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress. pp 1-10.
- Lorenz, A.W., Hering, D., Feld, C.K. & Rolauffs, P. (2004) A new method for assessing the impact of hydromorphological degradation on the macroinvertebrate fauna of five German stream types. Hydrobiologia. Volume 516, pp. 107–127.
- Lorenz, W.A., Jähnig, S.C. & Hering, D. (2009) Re-Meandering German Lowland Streams: Qualitative and Quantitative Effects of Restoration Measures on Hydromorphology and Macroinvertebrates. Environmental Management. Volume 44, pp 745-754.

- Meijles, E.W. & Williams, A. (2012) Observation of regional hydrological response during time periods of shifting policy. *Applied Geography*. Volume 34, pp. 456–470.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000) *Anders omgaan met water: Waterbeleid in de 21e eeuw*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Nakano, D., Nagayama, S., Kawaguchi, Y. & Nakamura, F. (2008) River restoration for macroinvertebrate communities in lowland rivers: insights from restorations of the Shibetsu River, north Japan. *Landscape and Ecological Engineering*. Volume 4, pp 63-68.
- Osborne, L.L., Bayley, P.B., Higler, L.W.G., Statzner, B., Triska, F. & Iversen, T.M. (1993) Restoration of lowland streams: an introduction. *Freshwater Biology*. Volume 29, pp 187-194.
- Poff, N.L. & Ward, J.V. (1989) Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: A Regional Analysis of Streamflow Patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Volume 46, pp 1805-1818.
- Schumm, S. A. 1977. *The Fluvial System*. New York: Wiley-Interscience. 338 pp.
- Sear, D.A., Briggs & Brookes, A. (1998) A preliminary analysis of the morphological adjustment within and downstream of a lowland river subject to river restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. Volume 8, pp 167–183.
- Tolkamp, H.H. (1980) Organism-substrate relationships in lowland streams. *Proefschrift Wageningen Universiteit*. 211 pp.
- van Dam, O., Osté, A.J., de Groot, B. & van Dorst, M.A.M. (2007) *Handboek hydromorfologie: Monitoring en afleiding hydromorfologische parameters Kaderrichtlijn Water*. RWS Waterdienst rapport WD 2007.006.
- van der Molen, D.T., Pot, R. Evers, C.H.M. & van Nieuwerburgh, L.L.J. (2012) Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2015-2021. STOWA rapport 2012-31.
- Van Rijn, L.C. (1993) *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications. 700 pp.
- Verdonschot, P.F.M., Driessen, O. van der Hoek, W. de Klein, J. Paarlberg, A. Schmidt, G., Schot, J. & de Vries, D. (1995) *Beken stromen: Leidraad voor ecologisch beekherstel*. STOWA-rapport, Utrecht.
- Verdonschot, P.F.M. & Nijboer, R.C. (2002) Towards a decision support system for stream restoration in the Netherlands: An overview of restoration projects and future needs. *Hydrobiologia*. Volume 478, pp. 131–148.

-
- Vivash, R., Ottosen, O., Janes, M. & Sørensen (1998) Restoration of the rivers Brede, Cole and Skerne: a joint Danish and British EU-LIFE demonstration project, II—The river restoration works and other related practical aspects. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. Volume 8, pp 197-208.
- Wolfert, H.P. (2001) Geomorphological change and river rehabilitation: case studies on lowland fluvial systems in The Netherlands. Ph.D. thesis, Utrecht University, The Netherlands. Alterra Scientific Contributions 6. 200 pp.
- Wynn , T.M., Mostaghimi, S., Burger, J.A., Harpold, A.A., Henderson, M.B. & Henry, L.A. (2004) Variation in Root Density along Stream Banks. *Journal of Environmental Quality*. Volume 33, pp 2030-2039.

BIJLAGEN



BIJLAGE A
AFVOERTIJDSERIES

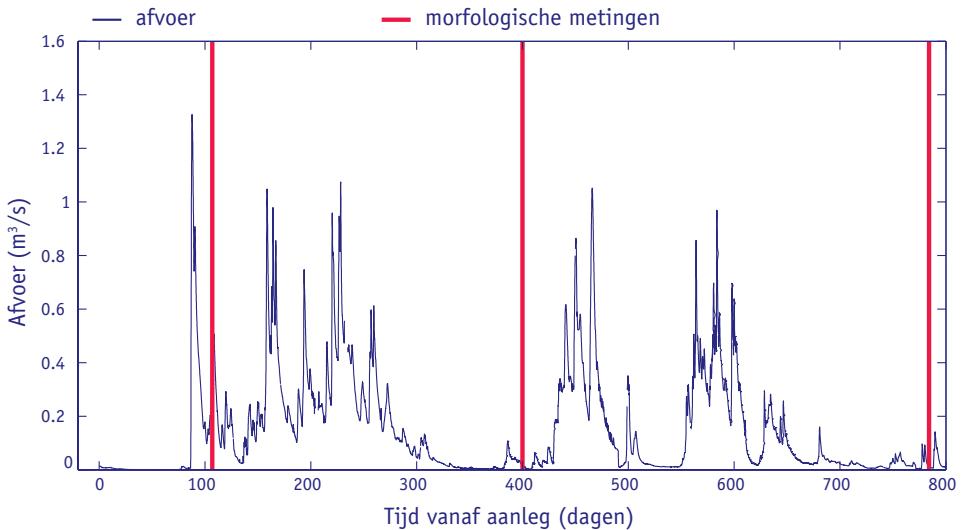
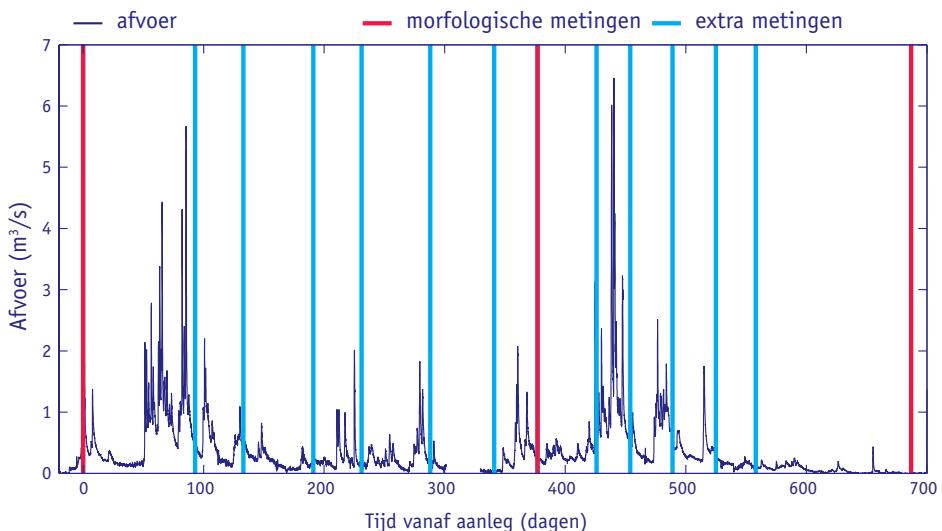
Fig 27 AFVOERTIJDSERIE EN MORFOLOGISCHE METINGEN HAGMOLENBEEK**Fig 28 AFVOERTIJDSERIE EN MORFOLOGISCHE METINGEN LUNTERSE BEEK**

Fig 29 AFVOERTIJDSERIE EN MORFOLOGISCHE METINGEN TUNGELOYSE BEEK

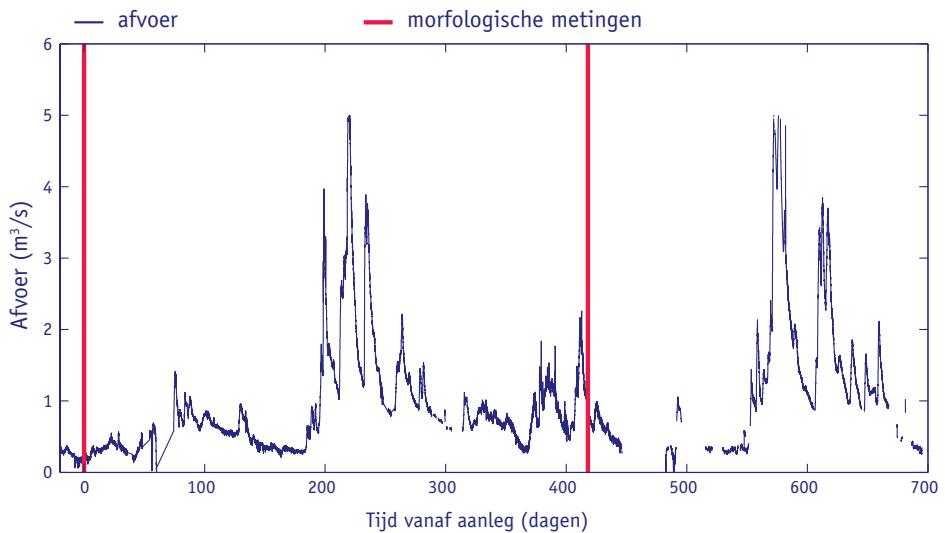
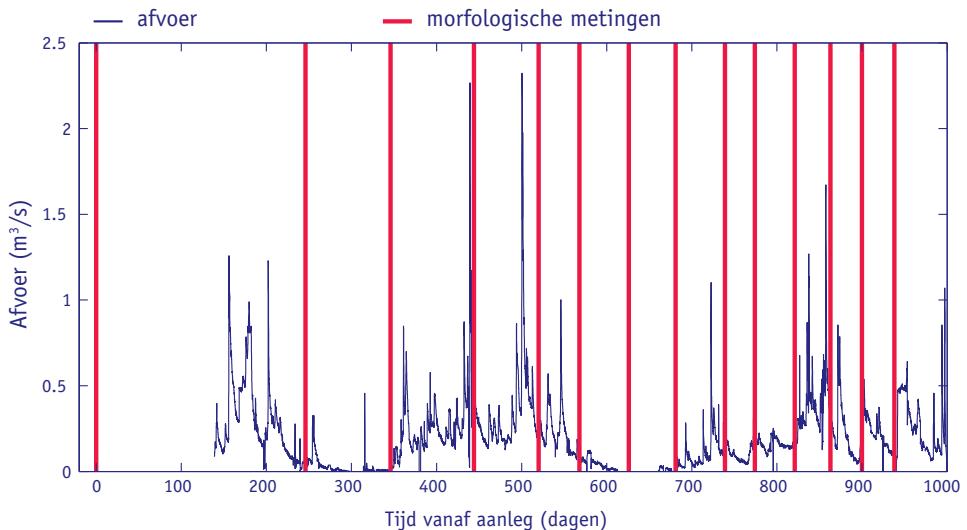


Fig 30 FIGUUR AFVOERTIJDSERIE EN MORFOLOGISCHE METINGEN HOOGE RAAM



BIJLAGE B
HISTORISCHE KAARTEN

Fig 31 HISTORISCHE ONTWIKKELING GELDERNS-NIERSKANAAL

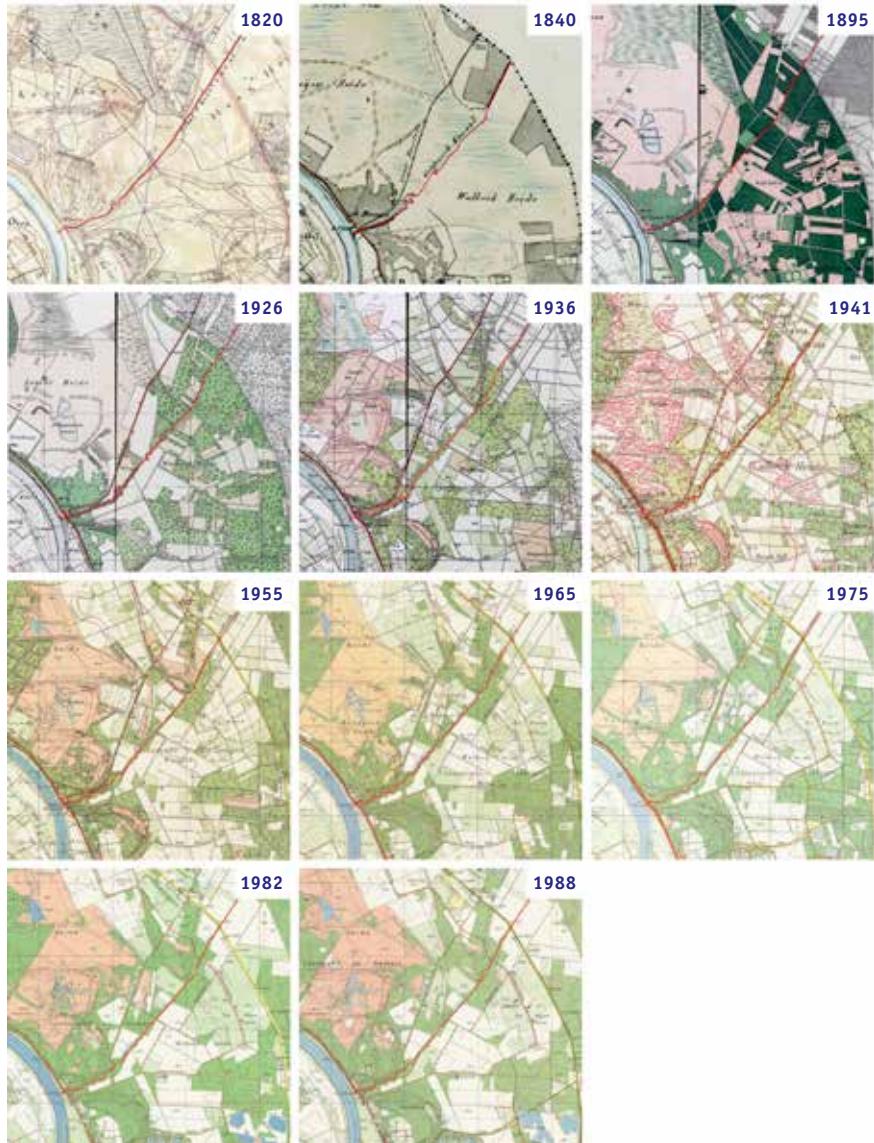


Fig 32 HISTORISCHE ONTWIKKELING HAGMOLENBEEK

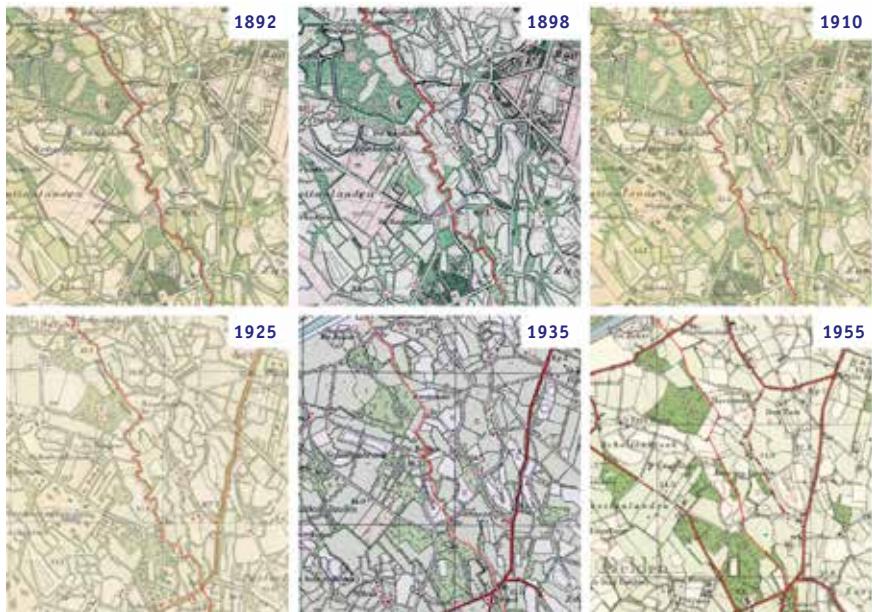


Fig 33 HISTORISCHE ONTWIKKELING LUNTERSE BEEK

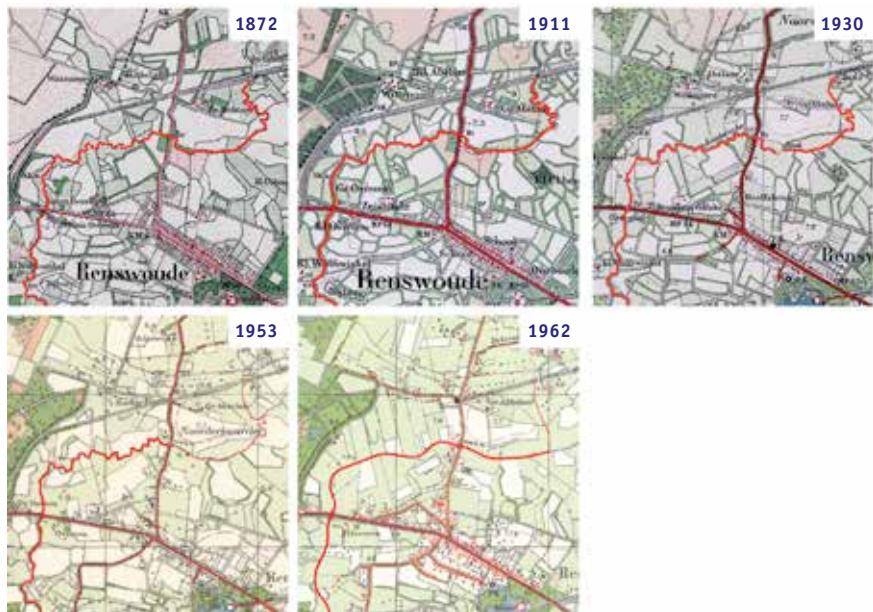
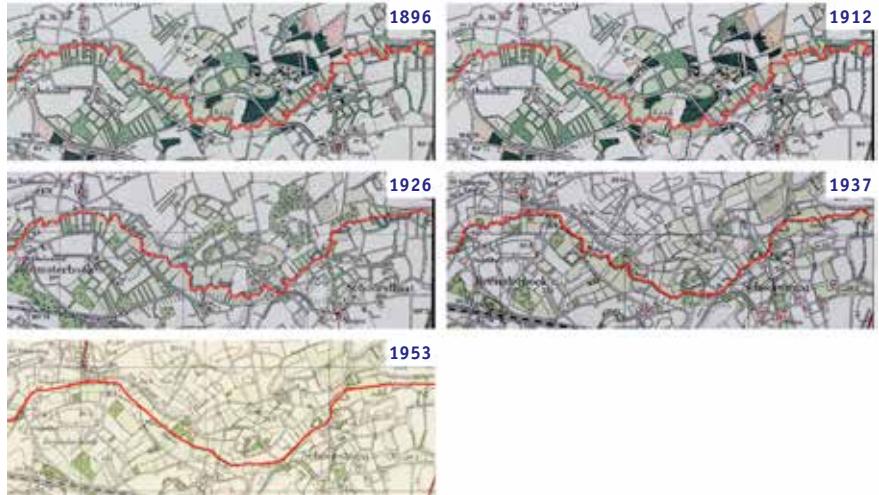


Fig 34 HISTORISCHE ONTWIKKELING TUNGELOYSE BEEK





STICHTING
TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 033 460 32 00 FAX 033 460 32 01
Stationsplein 89 3818 LE AMERSFOORT
POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

