

# BEEKDALBREED HERMEANDEREN



RAPPORT

2012  
36

BEEKDALBREED HERMEANDEREN:  
BOUWSTENEN VOOR DE 'LEIDRAAD VOOR INNOVATIEF  
BEEK- EN BEEKDALHERSTEL'

**RAPPORT**

2012

**36**

ISBN 978.90.5773.580.6



# COLOFON

**UITGAVE** Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

**AUTEURS** Piet Verdonschot, Anna Besse, Jan de Brouwer (Alterra), Joris Eekhout (Wageningen Universiteit), Rob Fraaije (Universiteit Utrecht)

**PROJECTGROEP** Bas Worm, Piet-Jelle Damsté (Waterschap Regge en Dinkel), Ineke Barten (Waterschap De Dommel), Peter-Paul Schollema (Waterschap Hunze en Aas), Rob Gerritsen (Waterschap Vallei en Eem), Peter van Beers, Rudy ten Tusscher (Waterschap Veluwe), Pui Mee Chan (STOWA), Frans Verdonschot, Inge Janssen (Waterschap Peel en Maasvallei), Mirja Kits, Joost Rooijackers (Waterschap Aa en Maas), Merel Soons (Universiteit Utrecht), Marieke de Lange (Alterra), Ton Hoitink (WUR), Christiaan Huising, Rob van den Braak

**REFERAAT** Het project Beekdalbreed Hermeanderen had tot doel om in de praktijk in beekherstelprojecten een gedempt afvoer- en een stabiel en gevarieerd habitatpatroon te realiseren door morfologische en hydrologische maatregelen in samenhang uit te voeren. Het hydromorfologisch onderzoek gaf aan dat inundaties in een vrijwel horizontaal winterbed het meest effectief zijn. Tegelijk zorgt dit bed voor een brede hydrologische dwarsgradiënt met een biodiverse vegetatie. Het verkleind profiel verbeterde de stromingscondities en habitatheterogeniteit wat tot een toename aan rheofiele soorten leidde. Het inbrengen van dood hout blijkt een goedkope en effectieve methode om de habitatheterogeniteit, de stromingsvariatie en de beekbiodiversiteit te verhogen.

**TREFWOORDEN** Beekherstel, Dood hout, Stroming, Habitatheterogeniteit, Gradiënt, Morfologie, Hydrologie, Aquatische ecologie, Terrestrische ecologie, Rheofilie, Zaadverspreiding, Afvoer, Alternerende banken, Macrofauna

**FOTO OMSLAG** Lunterse beek: hermeandering in een tweefasenprofiel vlak na aanleg (foto: P. Verdonschot 28-11-2011)

**DRUK** Kruyt Grafisch Adviesbureau

**STOWA** STOWA 2012-36

**ISBN** 978.90.5773.580.6

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

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

# TEN GELEIDE

Twee jaar hebben zeven waterschappen en drie onderzoeksgroepen intensief en constructief samengewerkt binnen dit project. Zij ontmoetten elkaar in projectbijeenkomsten en stemden bilateraal af. De waterschappen, als praktijkpartijen, hebben een belangrijke sturende rol gehad in het onderzoek. De uitwisseling van de ervaringen en kennis, het gezamenlijke brainstormen met de onderzoekers, het samen in praktijk brengen van maatregelen, het heeft allemaal bijgedragen aan de vorming van de voor u liggende nieuwe bouwstenen voor beekherstel.

Waterschappen hebben geprofiteerd van de grote hoeveelheid kennis die van de kennisinstellingen naar de waterschappen is overgedragen, zowel tijdens als buiten de vergaderingen. De waterschappen hebben hun nieuwe herstelplannen met deze kennis bijgesteld. Zo zou het vaker moeten gaan. De onderzoekers zijn dicht bij de praktijk komen staan, de waterschappers hebben een beter beeld van de recente nieuwe inzichten.

In hoofdstuk 5 is te lezen hoe de resultaten van dit onderzoeksproject gaan doorwerken in de praktijk, als volgens de opgebouwde nieuwe kennis wordt gehandeld. Daar kunt u lezen dat ook Staatsbosbeheer, Overijssels Landschap, Natuurmonumenten, Brabants Landschap, en particuliere landeigenaren allen op enigerlei wijze betrokken zijn geweest bij één of meerdere projecten. Ook zij hebben de positieve ervaringen inmiddels in hun organisaties verder gebracht.

Het onderzoek draagt er aan bij dat de het waterleven in Nederland wordt versterkt. Dat dit gepaard gaat met extensivering van het onderhoud van beken is mooi meegenomen.

Het wordt steeds duidelijker hoe we aan beekherstel moeten werken. Het lijstje van faal- en slaagfactoren in paragraaf 5.1 (al opgesteld in 2008) vertelt ons al veel over de aanpak die nodig is: integraal, multi-disciplinair, afgestemd, open, de tijd zijn werk laten doen.

We zijn er nog niet. Meer kennis is nog dringend gewenst, net als een goede overdracht van die kennis. Komende jaren is er nog werk genoeg te doen voor de betrokkenen. Dat zij aangeven dit werk zeker te zullen voortzetten, is verheugend.

We zien met interesse uit naar het vervolg.



Directeur STOWA  
J.M.J. LEENEN

# SAMENVATTING

De optimale combinatie van beekdalbrede, samenhangende morfologische en hydrologische maatregelen biedt een effectieve uitkomst voor de verbetering van ecologische leefomstandigheden voor de KRW-kwaliteitscomponenten, het behalen van een gewenste KRW-ecologische waterkwaliteit in de beek en de gewenste verbetering van de natuurkwaliteiten in het beekdal.

Het doel van het project Beekdalbreed Hermeanderen was om in de praktijk in beekherstelprojecten een gedempt afvoer- en een stabiel en gevarieerd habitatpatroon te realiseren door morfologische en hydrologische maatregelen in samenhang uit te voeren.

In zes beekdalbreed uitgevoerde hermeanderingen en in zeven projecten waarbij dood hout is ingebracht is onderzocht welke hydrologische, morfologische, terrestrisch- en aquatisch-ecologische effecten optraden.

Het hydrologische en morfologische onderzoek heeft laten zien dat afvoereffecten pas zichtbaar worden als lange (veel langere dan de onderzochte trajecten) trajecten worden gehermeanderd. Bij een project (Lunterse Beek) heeft hermeandering geleid tot een gedempte dynamiek in de waterdiepte. Dit was het gevolg van de aanleg van een vrijwel *horizontaal winterbed*. Grote morfologische veranderingen treden alleen vlak na aanleg op. Kleine morfologische veranderingen treden zeer lokaal op.

Het onderzoek naar de ontwikkeling van de beekdalvegetatie laat zien dat de meeste *nieuwe soorten en zaden via overstroming* met beekwater zich het herstelde gebied binnenkomen. Ten opzichte van niet herstelde beektrajecten is na 1 á 2 jaar al een toename in het aantal soorten te zien. Overstroming versnelt de kolonisatie van het beekdal. *Een brede hydrologische dwarsgradiënt zorgt voor een biodiverse vegetatie.*

Het beekmacrofauna-onderzoek laat zien dat *stromingscondities* belangrijk zijn en dat *hermeandering met verkleind p-rofiel de stromingscondities en habitatheterogeniteit sterk verbeteren*. Binnen de twee jaar na de hermeandering zijn *meer rheofiele soorten* en minder indicatoren voor stilstaand water aanwezig.

Het *inbrengen van dood hout* is een zeer effectieve methode gebleken om plaatselijk de *habitat-heterogeniteit en stromingsvariatie* in de beek te verhogen. Eén jaar na houtinbreng is duidelijk dat de veranderde habitatcondities gevolgen hebben gehad voor de macrofaunagemeenschap. In tegenstelling tot hermeandering leidt inbrengen van dood hout niet tot een afname van het totaal aantal soorten en individuen. *Inbreng van dood hout biedt daarmee veel perspectief om met behoud van bestaande waarden de beek te verbeteren.* Het inbrengen van dood hout vergroot in sterke mate de robuustheid van het beeksysteem.

Bij extrapolatie van de onderzoeksresultaten komen vier kernpunten naar voren:

- 1 Stroomgebiedsbenadering  
Het onderzoek ondersteunt het uitgangspunt dat herinrichting en ontwikkeling van beeksystemen in Nederland een aanpak vereisen die gericht is op het gehele stroomgebied.
- 2 Het verbinden van beek met beekdal  
In een beekdalbrede aanpak wordt de beek met het beekdal verbonden, hetgeen ruimte geeft aan evenwichtige en samenhangende hydrologische, morfologische en ecologische processen van het gehele beeksysteem.
- 3 Gedempte afvoerdynamiek en continue stroming  
Beekherstelmaatregelen vragen om het verhogen van de beekbodem, het versmallen van de beekbedding, het ruimte geven aan inundatie (waterberging) en het laten ontwikkelen of aanplanten van bomen die het herstelproces nog verder versnellen (meer beschaduwing en verkoeling, daarmee klimaatbestendig). Door inundatie wordt de beek gedempt in afvoerdynamiek en worden droog-natgradiënten in het beekdal in belangrijke mate hersteld. Inundatiezones bieden tegelijk mogelijkheden voor kleine profielen zodat bij lage afvoeren de beek toch blijft stromen (droogtebestrijding).
- 4 Hydromorfologie in balans  
Beekdalbreed herstel stoelt op in evenwicht zijnde kleinschalige erosiesedimentatieprocessen. Dit betekent dat beken slechts langzaam in het landschap bewegen.

Twee jaar is zeer intensief en constructief samengewerkt tussen zeven waterschappen en drie onderzoeksgroepen, zowel in het projectbijeenvolgenverband als bilateraal. De waterschappen als praktijkpartijen hebben een belangrijke sturende rol gehad in het onderzoek. De uitwisseling van de ervaringen en kennis maar ook het gezamenlijke brainstormen hebben bijgedragen aan afstemming en vorming van de nieuwe visie op beekherstel. Veel kennis van de kennisinstellingen is tijdens en buiten de vergaderingen naar de waterschappen overgedragen. De waterschappen hebben hiermee hun nieuwe herstelplannen bijgesteld. De onderzoekers zijn hierdoor dicht bij de praktijk komen staan. Over 2 jaar mondt dit gehele project uit in een *Leidraad Beekdalen Stromen: een handboek voor beek- en beekdalherstel*.

# STOWA EN HET WATERMOZAÏEK

## WAT IS WATERMOZAÏEK?

In het kennisprogramma Watermozaïek onderzoekt de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) samen met waterschappen en andere kennispartners bestaande en innovatieve maatregelen voor het verbeteren van de ecologische waterkwaliteit. Waterkwaliteit is een speerpunt in de Kaderrichtlijn Water (KRW). Onder de paraplu van het kennisprogramma testen waterbeheerders maatregelen in de praktijk uit, waardoor kennis wordt verzameld over de haalbaarheid, de betaalbaarheid en de effectiviteit ervan.

## RESULTATEN

De oogst van het kennisprogramma Watermozaïek is meervoudig. Watermozaïek:

- levert een nieuwe kijk op maatregelen waar waterschappen met het oog op de Kaderrichtlijn Water hard aan werken of over aan het nadenken zijn. Van veel van deze maatregelen is (nog) niet precies bekend hoe (kosten)effectief ze zijn. Door het werk binnen het Watermozaïek is hierover veel meer bekend geworden;
- heeft zeer interessante nieuwe maatregelen ontwikkeld en uitgetest;
- introduceert een nieuw diagnosesysteem, waarmee waterbeheerders hun watersystemen kunnen analyseren en de ecologische ontwikkelingen daarin kunnen volgen en bijsturen: het KRW-Volg- en Stuursysteem (VSS);
- ontsluit reeds bestaande wetenschappelijke kennis en maakt deze praktisch toepasbaar. Hierbij spelen de binnen het programma georganiseerde kennisdagen een belangrijke rol. STOWA brengt tijdens deze dagen waterschappers en wetenschappers met elkaar in contact. Zij kunnen op deze manier direct kennis en ervaringen uitwisselen.

## SAMEN DOEN

Dat mensen van waterschappen, Rijkswaterstaat, kennisinstellingen, universiteiten en adviesbureaus onder de vlag Watermozaïek nauw met elkaar samenwerken, biedt de beste garantie dat het programma de juiste kennis oplevert voor de praktijk van het regionale waterbeheer. Waterschappers en wetenschappers hebben bij het begin van het programma samen kennisvragen geformuleerd. Deze vragen vormen de basis voor de projecten die binnen het programma bestaan en nog worden uitgevoerd.

## STOWA

STOWA, de initiatiefnemer van Watermozaïek, is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart en verspreidt kennis die nodig is voor de opgaven waar waterbeheerders voor staan.

## VAN DENKEN NAAR DOEN

De resultaten van onderzoeksprojecten worden via het onderzoeksprogramma Watermozaïek van STOWA uitgewisseld met waterbeheerders die toepassing in hun beheersgebied overwegen.

## INNOVATIEPROGRAMMA KADERRICHTLIJN WATER

Het project wordt mede gefinancierd vanuit het innovatieprogramma Kaderrichtlijn Water, uitgevoerd door Agentschap NL in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Kijk voor meer informatie op [www.watermozaiek.nl](http://www.watermozaiek.nl).

# BEEKDALBREED HERMEANDEREN

## INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA EN HET WATERMOZAÏEK	
<b>1</b>	<b>INLEIDING EN DOEL</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding en probleemstelling	1
1.2	Doel	1
1.3	Achtergronden	2
1.3.1	Ontstaan van beken	2
1.3.2	Knelpunten	2
1.3.3	Ontwikkelingsrichting	3
<b>2</b>	<b>WERKWIJZE</b>	<b>5</b>
2.1	Oplossingsrichtingen bij beeksysteemherstel	5
2.2	Beekdalbrede hermeanderingsmaatregelen	6
2.3	Protocol 'inbrengen dood hout in de beek'	7
2.3.1	Introductie	7
2.3.2	Voorwaarden	8
2.3.4	Protocol	8
2.4	Algemene meetopzet	11



<b>3</b>	<b>VOORBEELDEN RESULTATEN</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Hydrologie en morfologie</b>	<b>13</b>
3.1.1	Introductie	13
3.1.2	Hydrologische metingen	13
3.1.3	Morfologische metingen	14
3.1.4	Hydrologische processen	15
3.1.5	Morfologische processen	17
<b>3.2</b>	<b>Beekbegeleidende vegetaties</b>	<b>24</b>
3.2.1	Introductie	24
3.2.2	Het vegetatieonderzoek	25
3.2.3	Zaaddepositie	25
3.2.4	Kieming	27
3.2.5	Vegetatie-ontwikkeling	29
<b>3.3</b>	<b>Beekmacrofauna</b>	<b>30</b>
3.3.1	Introductie	31
3.3.2	Kunstbeekexperimenten	32
3.3.3	Beekmacrofaunamonitoring	33
3.3.5	Kokerjuffergedrag in experimenten	34
3.3.6	Hermeandering	38
3.3.7	Inbrengen dood hout	41
<b>4</b>	<b>ONDERZOEKSCONCLUSIES</b>	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Hydrologische en morfologische processen</b>	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Beekdalvegetatie-ontwikkeling</b>	<b>47</b>
<b>4.3</b>	<b>Beekmacrofauna-ontwikkeling</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>DOORWERKING VAN DE RESULTATEN</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Kennis in de praktijk gebracht</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Integrale aanpak van beekherstel</b>	<b>49</b>
<b>5.3</b>	<b>Winsten door de nieuwe aanpak</b>	<b>50</b>
<b>5.4</b>	<b>Doorwerking naar andere beken</b>	<b>51</b>
<b>5.5</b>	<b>Innovatieve kernuitgangspunten</b>	<b>52</b>
<b>5.6</b>	<b>Aanvullende positieve effecten</b>	<b>53</b>
<b>5.7</b>	<b>Samenwerking onderzoek-praktijk</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>56</b>

# 1

## INLEIDING EN DOEL

### 1.1 AANLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

In heel West-Europa zijn in de afgelopen eeuw beken rechtgetrokken, vastgelegd, gestuwd en aangepast om een zo groot en snel mogelijke afvoer van water te bereiken. Samen met de eutrofiëring heeft dit geleid tot een sterke afname in de ecologische kwaliteit van beken en tot verdroging van beekdalen, maar ook tot problemen met overstromingen benedenstrooms door de versnelde waterafvoer. De gevolgen van klimaatverandering zullen deze situatie in de toekomst verder doen verslechteren. Om de ecologische waterkwaliteit en retentiecapaciteit van beeksystemen te verbeteren wordt in binnen- en buitenland beekherstel uitgevoerd. Nederland speelt hierbij een leidende rol, waarbij beekherstel plaatsvindt in het kader van zowel de Kaderrichtlijn Water (KRW), Waterbeheer van de 21e Eeuw (WB21) en Natura2000.

De invulling van beekherstel varieert van het aanleggen van natuurlijkere oevers tot het graven van nieuwe beekprofielen. Vaak wordt gekozen voor hermeanderen in de vorm van een tweefasen, plasdras of verkleinde beekbedding. Recent onderzoek wijst echter uit dat bij de huidige aanpak van beekherstel ecologische kwaliteitsverbetering sterk achterblijft (Verdonshot & Didderen, 2009). Daarbij valt op dat vooral grote aandacht uitgaat naar de vorm van de beekloop en soms het beekdal, maar dat stroming en de mate van gebruik van de beekdalbodem voor inundatie minder in beeld zijn.

Morfologie en hydrologie kunnen echter niet los van elkaar worden gezien en de meest succesvolle beekherstelprojecten uit het verleden zijn die projecten waarin integraal herstel dat zich uitstrekt over het hele beekdal is uitgevoerd (Verdonshot et al., 2009). Aanvullende maatregelen die de morfologie, hydrologie en de samenhang daartussen verzorgen zijn nodig om de hermeanderingsprojecten in de toekomst succesvol en effectief te maken.

### 1.2 DOEL

Het doel van het project Beekdalbreed Hermeanderen was om in de praktijk in beekherstelprojecten een gedempt afvoer- en een stabiel en gevarieerd habitatpatroon te realiseren door morfologische en hydrologische maatregelen in samenhang uit te voeren.

De optimale combinatie van beekdalbrede, samenhangende morfologische en hydrologische maatregelen biedt een effectieve uitkomst voor de verbetering van ecologische leefomstandigheden voor de KRW-kwaliteitselementen en het behalen van een gewenste KRW-ecologische waterkwaliteit in de beek en de gewenste verbetering van de natuurkwaliteiten in het beekdal.

### 1.3 ACHTERGRONDEN

#### 1.3.1 ONTSTAAN VAN BEKEN

Beken hebben sinds de ijstijden het Nederlandse zandlandschap vormgegeven. Het stromende water heeft erosiegeulen doen ontstaan die later in sommige gebieden weer 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 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 is daar veelal ook direct van afhankelijk.

#### 1.3.2 KNELPUNTEN

Beken komen in heel Oost- en Zuid-Nederland, de overgang naar Laag Nederland en langs de binnenduinrand voor. Higler et al. (1995) komen tot een schatting van 17000 km beeklengthe in Nederland. Bijna een derde hiervan zal tot 2027 hersteld gaan worden.

Nagenoeg natuurlijke beekdalrestanten komen nog slechts versnipperd over Nederland voor, op sommige plekken als langere trajecten van nog meanderende beken. De isolatie van deze relictten van natuurlijke beken wordt versterkt door de slechte milieuomstandigheden (lichtinval, eutrofiering, stromingsbeperkingen) in veel tussenliggende beektrajecten en 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 waterklimaat, waterkwantiteit en -kwaliteit en morfologie vormen de knelpunten in de huidige beeksystemen:

*Hydrologie:* Door menselijke beïnvloeding is de natuurlijke staat van bijna alle Nederlandse beken en beekdalen aangetast. De waterkwantiteit is sterk beïnvloed door de toegenomen ontwatering van landbouwgronden, de sterke toename van afwatering over verhard oppervlak en de regulatie van beken. Het neerslagwater wordt versneld afgevoerd, waardoor in de beek sterke fluctuaties in de afvoer ontstaan. In het beekdal treedt vaak verdroging op, hetgeen zich uit in daling van de grondwaterspiegel en vermindering van kwelstromen. Het verdrogingseffect wordt veroorzaakt door ontwatering van aangrenzende landbouwgebieden en lokaal versterkt door wateronttrekking ten behoeve van drink-, industrie- en irrigatiewater. Door ontwatering en het rechtrekken en het anderszins 'normaliseren' van meanders, is het waterpeil in beken gedaald en is de ruimtelijke variatie in stroomsnelheden geminimaliseerd. Bij de laatste nog inunderende beken worden de frequentie en de omvang van overstromingen beïnvloed door een veranderd landgebruik. Door het aandeel verhardt oppervlak bovenstrooms. Extreme fluctuaties in afvoer, frequente droogval en vermindering van kwelstromen leiden tot afname van biodiversiteit en verklaren de slechte scores van KRW-ecologische waterkwaliteit.

*Morfologie:* Veel beken zijn in het verleden gekanaliseerd (recht getrokken) en/of genormaliseerd (onder normprofiel gebracht) en gereguleerd (van stuwen voorzien). Hierdoor is de beek verdiept en het peil verlaagd t.o.v. het maaiveld. Daarnaast zijn veel beekbegeleidende houtwallen en bossen gekapt. Door deze morfologische verstoringen is de variatie aan structuren in de beken grotendeels verloren gegaan. Wanneer door kanalisatie, normalisatie en regulatie het water langzamer stroomt en in de zomer zelfs tijden lang stil staat, verslibt de beekbodem, sterven zuurstofbehoefte dieren en verdwijnen beekplanten. Een andere belangrijke structuurverstoring is onderhoud. Het vrij maken en houden van de stroomgeul,

door bijvoorbeeld het verwijderen van ingevallen bomen, takken en blad, grijpt in op een basaal proces (patroondifferentiatie) in het functioneren van beekecosystemen. Het verwijderen van omgevallen bomen en ingevallen takken leidt tot een verwijderen van natuurlijke obstakels die de beekbodem vasthouden en voor het grootste deel van de habitatvariatie in een beek zorgen. Mede hierdoor zijn beken verder ingesneden en zijn veel soorten verdwenen. Het verwijderen van de beekbegeleidende bomen heeft ook de lichtinval vergroot, wat het eutrofiëringseffect versterkt, en de watertemperatuur doen stijgen, wat koude minnende beeksoorten heeft doen verdwijnen.

Waterkwaliteit: Ecologische beekkwaliteit is afhankelijk van de kwaliteit van toestromend grondwater vanuit infiltratiegebieden en de kwaliteit van het oppervlakkig afstromende water afkomstig uit de directe omgeving. Het gebruik van gronden in een stroomgebied bepaalt daarmee in sterke mate de toestand van de beek. Beken zijn daarom graadmeters van de kwaliteit van het water in een stroomgebied. Het intensieve grondgebruik in Nederland heeft de waterkwaliteit van veel van de beken doen verslechteren. Organische belasting, eutrofiëring, waterinlaat en milieuvreemde stoffen verlagen de waterkwaliteit van beken. De toevoer van organische stoffen beperkt zich tegenwoordig tot incidentele lozingen met zuurstofbindende stoffen en kan leiden tot tijdelijke zuurstofloosheid (verstikking). Eutrofiëring leidt tot overmatige algenontwikkeling en waterplantengroei. Inlaat van gebiedsvreemd water leidt tot verandering van de natuurlijke watersamenstelling. Plaatselijk wordt de waterkwaliteit ook nadelig beïnvloed door milieuvreemde stoffen. Het betreft toevoer van microverontreinigingen, zware metalen en bestrijdingsmiddelen (vergiftiging). Verder zorgen inundaties met beekwater van matige tot slechte kwaliteit voor verrijking (eutrofiëring) van de geïnundeerde beekbegeleidende gronden.

Naar verwachting voldoen slechts 30-50% van de Nederlandse beken in 2027 aan de EKR-normen (Ligtvoet et al., 2008). Voor het KRW-element macrofauna in Nederlandse beken betekent dit dat de gemiddelde EKR-score van 0,38 in de huidige situatie in 2027 is verbeterd naar 0,48-0,5 (Ligtvoet et al., 2008). Ten opzichte van de norm van een score van 0,6 betekent dat ondanks de genomen maatregelen de macrofauna en daarmee de KRW-waterkwaliteit (naar het principe 'one-out-all-out') voorlopig achter loopt bij het behalen van betreffende KRW-doelen.

Ook de recent uitgevoerde beekherstellenquête laat zien dat huidige herstelprojecten meestal niet effectief zijn, waardoor de KRW-doelstellingen voor ecologische kwaliteit niet worden gehaald (Verdonschot & Didderen, 2009). In dit onderzoek is ook een analyse uitgevoerd van monitoringsdata van negen beekherstelprojecten. Er blijken weinig gegevens van projecten beschikbaar te zijn, waarbij voldoende monitoring heeft plaatsgevonden zowel voor als na het uitvoeren van de maatregelen. Verder blijkt de opzet van de monitoring vaak zodanig te zijn dat vergelijking met de situatie van voor herstel niet mogelijk is.

Het met de huidige hermeanderingsmaatregelen niet behalen van de KRW-ecologische waterkwaliteit in Nederlandse beken betekent dat er nog meer inspanning geleverd moet gaan worden in de toekomst. Alle in dit project voorgestelde aanvullende maatregelen hebben als doel ervoor te zorgen dat de KRW-doelstellingen in beken wél gehaald gaan worden.

### 1.3.3 ONTWIKKELINGSRICHTING

Natuurlijk functionerende beken met de beekbegeleidende vegetatie onderhouden zichzelf; het afstromende water houdt de beken schoon en open. Het ingevallen blad en ophopingen van organisch materiaal worden tijdens hogere afvoeren weer opgeruimd. Tegelijk buffert het ingevallen hout en blad deze hogere afvoeren. Tijdens extreem hoge afvoeren vormt de

beek haar eigen weg in het landschap, waardoor natuurlijke kronkels en meanders ontstaan. De beekbegeleidende bomen houden echter de beekoever vast, beperken de lichtinval en koelen het beekwater. Deze zelfregulerende processen geven aanleiding tot een hoge structuurrijkdom die ruimte biedt aan veel organismen. Dit beekstelsel heeft een grote zelfreinigende capaciteit. In de natuurlijke beek vindt geen onderhoud plaats, wordt een natuurlijk peilregime gevolgd en worden de oevers aan de beek teruggegeven. Beekdalbreed hermeanderen beoogt een stap in de richting van dit natuurlijk beekstelsel te zetten. Vernieuwd beekdalbreed hermeanderen vindt plaats om tegelijkertijd meerdere effecten te bereiken. In het kort zijn de belangrijkste effecten:

- 1 Verbetering van het leefmilieu van beek- en beekdalorganismen en daarmee verbetering van de waterkwaliteit en het leefmilieu van veel positieve KRW-indicatoren en de complete water- en natuurkwaliteit. Naar schatting zal met deze additionele maatregelen beekherstel de Ecologische KwaliteitsRatio doen verdubbelen. De gestelde KRW-doelen komen hiermee sneller binnen handbereik;
- 2 Kostenbesparing door het verhogen van de effectiviteit van de al geplande beekhermeandering. Een gemiddeld beekherstelproject kost ongeveer 0,3 tot >1 miljoen euro. Het achterblijven van positieve resultaten in termen van waterberging en ecologie zou een schadepost van gelijke grootte opleveren. De innovatieve aanvullende maatregelen buigen dit risico om in een grote kans op succes in het behalen van KRW-doelen;
- 3 Verbreding van het denken over maatregelen ten behoeve van het bereiken van ecologische doelen. De integrale benadering (van de beek en het beekdal als een systeem) die nodig is bij beekdalbreed hermeanderen leidt tegelijk tot een integraler denken van alle betrokkenen, hetgeen een multiple winst oplevert bij vervolgprojecten.

Neveneffect hierbij is dat de maatregel beekdalbreed hermeanderen zich niet tot één locatie beperkt, maar tegelijk:

- I ruimtelijk een groot oppervlak omvat als een stelsel van samenhangende milieuparameters;
- II temporeel gedurende de verschillende seizoenen en jaren eisen stelt om ook incidentele droogval of extremen in de afvoer te voorkomen en dus tegemoet komt aan WB21-doelen.

# 2

## WERKWIJZE

### 2.1 OPLOSSINGRICHTINGEN BIJ BEEKSYSTEEMHERSTEL

De KRW-waterkwaliteitsbeoordelingen voor beken laten zien dat veel beken momenteel onvoldoende scores voor één of meer biologische KRW-kwaliteitselementen. Vaak hangt deze lage score samen met een te laag aantal of te geringe abundantie van stromingsafhankelijke soorten. Een verstoorde stromingskarakteristiek impliceert ook een verstoorde morfologie. De stromingsafhankelijke soorten hebben óf onvoldoende stroming óf ongeschikt habitat beschikbaar tijdens een of meer van hun levensfasen voor een duurzaam bestaan. Bij hermeandering gaat vaak veel aandacht uit naar morfologie, de vorm en gevarieerdheid (in aard en samenstelling) van het breedte- en lengteprofiel. Eén van de meest sturende kenmerken voor de ecologie van beken is echter de continuïteit en relatieve constantie in de afstroming van het beekwater. Een gevarieerde morfologie van de beekbedding en de daarin aanwezige structuren, zoals dood hout, zorgt hierbij voor stromingsvariatie op mesoschaal in ruimte en tijd.

Hydrologie en morfologie zijn dus onderling direct afhankelijk en bepalen in sterke mate de ecologische kwaliteit. Indien bij hermeandering geen hydrologische maatregelen (dempen van hoge afvoeren en voorkomen van lage afvoeren, stagnatie en droogval) worden genomen, treden bij hoge afvoeren te hoge stroomsnelheden op en vindt erosie van bodem- en oevermateriaal, maar ook van planten en dieren plaats. Bij lage afvoeren treden juist verslibbing van de beekbodem en zuurstofafname op. Het overall effect voor de aquatische organismen en daarmee de KRW-waterkwaliteit is een vermindering van het aantal soorten en hun habitats. Ruimte voor inundatie topt hoge afvoeren af en verzekert doorstroming in droge tijden. De continue stroming en het gelijktijdig gebruik van de beekdalbodem voor inundatie zijn bij beekherstel vaak minder in beeld.

Tenslotte wordt bij hermeanderen het profiel nieuw gegraven en wordt daarmee het beekecosysteem op nul gezet. Deze extreme vorm van vernietiging van het bestaande ecosysteem en vervanging door een maagdelijk nieuw ecosysteem leidt tot een zeer lange ontwikkelingstijd, voordat ecologische waarden terug zullen keren.

Momenteel zijn er bij hermeandering (het meer of minder meanderend lengteprofiel) enkele ‘standaard beekprofielen’ in omloop met daartussen allerlei overgangsvormen, namelijk:

- 1 het tweefasenprofiel (met een verdiept winterbed en een soms verkleind zomerbed);
- 2 het plasdrasprofiel (met aan een of beide oevers een flauw oplopend talud gegraven van beekinsteek tot aan hogere gronden).

Deze profielen worden afhankelijk van de functies van de omgeving. Daarbij worden in de praktijk van de uitvoering vaak niet te hoge grondwaterstanden en het voorkomen van inundaties reden om deze profielen, ondanks de hermeandering, overgedimensioneerd uit te voeren. Doordat in de tweefasenprofielen inundaties buiten de winterbedding worden voorkomen, treden in de bedding hoge afvoeren op die nadelig zijn voor de ecologische kwaliteit.

Ook blijken de meeste zomerbedden vergelijkbaar te zijn geprofileerd als het eerdere rechte profiel. Plasdrasprofielen zijn altijd overgedimensioneerd (een bij de mediane afvoer te ruime bedding m.a.w. hydrologie en morfologie zijn niet in balans). Overdimensioneren leidt bij lage afvoeren tot stagnatie en zuurstofarmoede en bij gemiddeld afvoeren tot een gebrek aan licht bij de bodem. Beide omstandigheden leiden tot verlies van beekorganismen.

Gecombineerd hydrologisch en morfologisch herstel kan alleen wanneer de problemen niet alleen in de beek, maar over grotere delen van het beekdal worden aangepakt. Bij te hoge eutrofiering komt hier de aanpak van voedselverrijking bij. De hydromorfologie omvat de beek én de beekoever met beekbegeleidende vegetatie. Is dit gehele beeksysteem in goede ecologische conditie en kan inundatie optreden, dan draagt dit in belangrijke mate bij aan een goede KRW-waterkwaliteit en kunnen zich natuurwaarden ontwikkelen op de beekoevers. Door hydrologie en morfologie gelijktijdig en beekdalbreed uit te voeren, is de kans op succesvol beekherstel verzekerd. Soms is echter onvoldoende ruimte voor beekdalbreed herstel. Het is een misvatting dat beken overal zouden meanderen. De beekorganismen zijn niet afhankelijk van de meanders, maar van de habitat- of substraatheterogeniteit in de beek. Door de heterogeniteit te vergroten kan veel ecologische winst worden behaald. Een van de eenvoudige methoden om deze heterogeniteit te bereiken is het inbrengen van dood hout in de beek.

## 2.2 BEEKDALBREDE HERMEANDERINGSMAATREGELEN

De innovatieve aanpak die in het project Beekdalbreed Hermeanderen is ontwikkeld, speelde in op het bereiken van de beekdalbrede optimale combinatie van morfologische en hydrologische omstandigheden. Omstandigheden die randvoorwaarden zijn voor optimale ecologische leefomstandigheden van de KRW-kwaliteitscomponenten en beekbegeleidende ecosystemen. De innovatieve maatregelen die zijn onderzocht hadden als centraal doel het dempen van dynamiek in de afvoer (het door het jaar aanwezig zijn van redelijk constante stroming) van een beek en tegelijk het ontwikkelen van een grote morfologische variatie.

Bij de verschillende beekprofielen zijn de maatregelen toegepast om het gestelde doel te bereiken:

- 1 Bij voorkeur zijn de voorgenomen hermeanderingsprofielen sterk verondiept en in de breedte versmald, waarbij inundatie van de beekbegeleidende gronden mag gaan optreden;
- 2 Indien een tweefasenprofiel was beoogd, is gestreefd naar de aanleg van een breder winterbed (door afgraven in orde van grootte 50 á 100 meter in beide dwarsrichtingen op de beek) waarbij dit bed gaat functioneren als waterbergingsgebied en inundatiezone en als drager van natte beekbegeleidende natuur;
- 3 Indien een plasdrasprofiel was beoogd, is het flauwe talud zoveel mogelijk afgevlakt en het zomerbed verkleind waardoor hoge afvoeren veel langer inunderen, terwijl bij lagere afvoeren een basisafvoer en daarmee continue stroming in een zomerbed is gewaarborgd;
- 4 In andere beken is dood hout ingebracht wat de stromings- en habitatvariatie en de waterretentie en bodemophoging initieert. Deze maatregel is zeer kosteneffectief en is tevens een eenvoudige kwaliteitsverbeterende maatregel die in alle gevallen extra winst oplevert. De maatregel kan alleen worden toegepast indien in de beek stroming en kwaliteit reeds op minimaal basiskwaliteitsniveau zijn.

In het project Beekdalbreed Hermeanderen zijn verschillende maatregelen in dertien praktijkprojecten voor hermeandering uitgevoerd: zes hermeanderings- en zeven dood houtprojecten (Tabel 1). De resultaten van ecologisch herstel zijn in deze praktijksituaties gemonitord en geëvalueerd. Daarnaast is experimenteel onderzoek uitgevoerd om de aannames binnen

het project te onderbouwen. Er is gekozen voor laboratoriumexperimenten omdat in praktijkomstandigheden allerlei niet gecontroleerde processen een betrouwbare kwantificering in de weg staan.

TABEL 1 PRAKTIJKPROJECTEN 'HERMEANDEREN' EN 'INBRENGEN DOOD HOUT'

<b>Hermeanderen</b>		
<b>Beek</b>	<b>Maatregel</b>	<b>Waterschap</b>
Kleine Aa	versmallen met inundatiezone	De Dommel
Lunterse beek	verondiepen en versmallen met inundatiezone	Vallei & Eem
Hagmolenbeek	verondiepen en versmallen met inundatietalud	Regge & Dinkel
Tungelroyse beek	versmallen met inundatiezone	Peel & Maasvallei
Hoge Raam	verondiepen en versmallen in verdiepte inundatiezone	Aa & Maas
Grift	verondiepen en versmallen met inundatiezone	Veluwe
<b>Inbrengen van dood hout</b>		
Hierdensche beek	inbrengen dood hout	Veluwe
Lunterse beek	inbrengen dood hout	Vallei & Eem
St Antoniusloop	inbrengen dood hout	Aa & Maas
Tongelreep	inbrengen dood hout	De Dommel
Tungelroyse beek	inbrengen dood hout	Peel & Maasvallei
Jufferbeek	inbrengen dood hout	Regge & Dinkel
Gasterense Diep	inbrengen dood hout	Hunze en Aa's

## 2.3 PROTOCOL 'INBRENGEN DOOD HOUT IN DE BEEK'

### 2.3.1 INTRODUCTIE

Het inbrengen van dood hout in een beek is een eenvoudige, kosteneffectieve maatregel voor ecologische waterkwaliteit door het verbeteren van de hydromorfologische processen, zoals stromingsvariatie en habitatheterogeniteit.

Het onderzoek binnen het project Beekdalbreed Hermeanderen heeft aangetoond dat het inbrengen van dood houtstructuren zorgt voor de variatie in stromingsprocessen en diverse leefmilieus oplevert. Beide leiden tot een versterking van de macrofauna en plaatselijke macrofytendiversiteit. Dood hout en materiaal dat dood hout invangt, dient als voedsel voor de fauna in het beekecosysteem. Dood hout verbetert de habitatheterogeniteit en voedselaanvoer en verhoogt daarmee het leefmilieu van beekorganismen en dus de ecologische waterkwaliteit. Het leefmilieu van veel positieve KRW-indicatoren en de algehele water- en natuurkwaliteit worden hiermee verbeterd. De gestelde KRW-doelen zullen in deze beektrajecten veel gemakkelijk gehaald kunnen worden.

Het inbrengen van dood hout levert een grote kostenbesparing op omdat met een zeer eenvoudige ingreep grote ecologische winst wordt behaald. Naar schatting levert houtinbreng evenveel op als beekhermeandering in termen van ecologische winst in de beek. Een gemiddeld beekhermeanderingsproject kost echter circa honderd keer meer dan een dood hout project.

Naast het verhogen van de ecologische waarden van de beek, zijn positieve neveneffecten van het aanbrengen van dood hout in de beek het vergroten van de retentie van de beek en het verhogen van de beekbodem, waardoor de drainerende werking van diepe insnijding wordt tegengegaan.



### 2.3.2 VOORWAARDEN

Het dood hout kan in alle beken worden ingebracht, mits randvoorwaarden zoals stroming en waterkwaliteit al op basiskwaliteitsniveau zijn. Juist in gekanaliseerde beken (met enige stroming) wordt met deze maatregel de meeste ecologische winst behaald.

De risico's van het inbrengen van dood hout zijn geringer dan vooraf is gedacht. Het eroderen van de beekoever en het opstuwen of verstopt raken van de beek treden niet op wanneer bij het inbrengen van het dood hout het protocol wordt gevolgd.

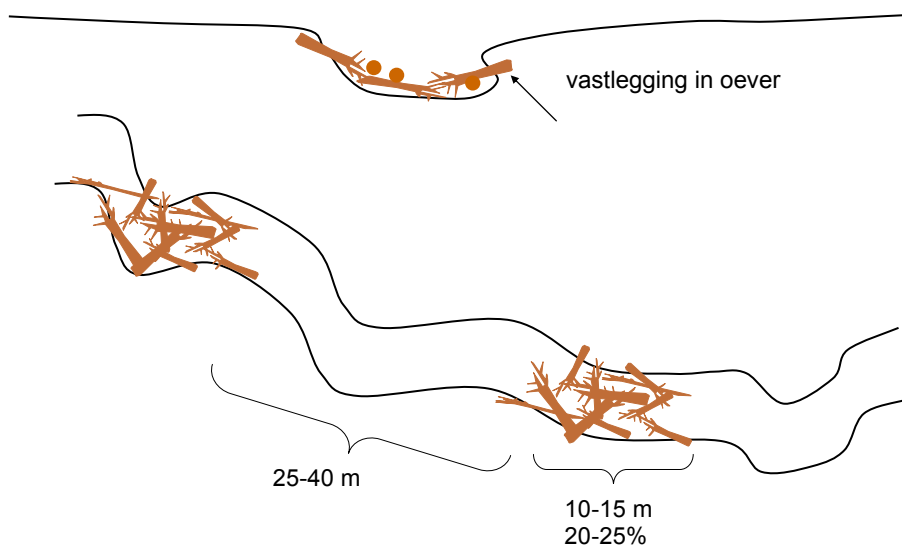
Bij voorkeur is het ingerichte traject minimaal 500 m. Uiteraard ligt het meer voor de hand dood hout in te brengen in een traject begeleidt door bomen dan in een open landschap.

### 2.3.4 PROTOCOL

Het inbrengen van dood hout betekent dat houtig materiaal als doorstroombare verspreide 'houtpakketten' van boomstammen (diameter > 20 cm) en takken (diameter > 5 cm) worden aangebracht in een beektraject. Iedere houtpakket omvat minimaal 75% van de beekbreedte, maar bij voorkeur de gehele breedte, en beslaat een oppervlak van circa 10-15 m<sup>2</sup>. Dit komt neer op een bedekking van 20-25% van de beekbodem in het betreffende beekgedeelte. De afstand tussen houtpakketten bedraagt circa 25-40 m, afhankelijk van de lokale situatie. Een traject van 500 m kan op een dag worden ingericht.

Door de takken en boomstammen vanaf de oever in de beek te plaatsen en onderling te 'verweven' wordt extra stevigheid verkregen. Waar mogelijk worden per houtpakket de dickere boomstammen in de oever verankerd en worden de overige boomstammetjes en takken in deze vastgelegde structuren verweven. Het is de bedoeling dat bladval in de herfst zorgt voor een aanvulling van nog eens 25% organisch materiaal. Bij de keuze van het hout worden niet alleen dikke stammen, maar zoveel mogelijk kronen gebruikt. Het verdient de aanbeveling om de zogenaamde hardhoutsoorten, zoals eik en beuk, te gebruiken en wilg of populier te mijden, omdat deze laatste soorten gemakkelijk uitlopen. De positionering van het hout is zodanig dat de stroomdraad niet langs de oevers ligt, maar verspreidt over het houtpakket loopt. De houtpakketten moeten zodanig ingericht worden dat het water tijdens de piekafvoer over de pakketten heen stroomt.

SCHEMATISCH PATROON VAN HET 'INBRENGEN VAN DOOD HOUT' IN DE BEEK



VOORBEELD: HET INBRENGEN VAN DOOD HOUT IN DE TUNGELROYSE BEEK



VOORBEELD: HET INBRENGEN VAN DOOD HOUT IN DE TUNGELROYSE BEEK





## 2.4 ALGEMENE MEETOPZET

### MEETPROGRAMMA PRAKTIJKPROJECTEN HERMEANDERING

Het meetprogramma is voor ieder praktijkproject gestandaardiseerd uitgevoerd, zodat de resultaten van alle innovatieve maatregelen met elkaar zijn te vergelijken en als basis kunnen dienen voor evaluatie. De meetopzet is ontworpen als een before-after-control-impact (BACI) design (Tabel 2). Dit betekent dat bij ieder praktijkproject is gestreefd naar het verzamelen van gegevens:

- vooraf aan de ingreep, zodat de nulsituatie is gekwantificeerd;
- na de ingreep zodat de effecten kunnen worden geëvalueerd;
- in het traject waar de maatregel wordt/is uitgevoerd (maatregeltraject); in een controletraject om de temporele veranderingen in ecologie die maatregelonafhankelijk zijn uit te schakelen.

Het controletraject is bij voorkeur een zelfde beek nabij de te herstellen beek of is gelegen in een traject bovenstrooms van het te herstellen beektraject.

TABEL 2 HET VOOR-NA-CONTROLE-INGREEPONTWERP VOOR MAATREGELEFFECTONDERZOEK

Beektraject	Voor uitvoeren maatregel	Na uitvoeren maatregel
maatregeltraject	x	x
controletraject	x	x

In het project Beekdalbreed Hermenaderen was het niet mogelijk om alle projecten op deze wijze wetenschappelijk verantwoord te monitoren. In de beken waarbij aanvang van het project maatregelen reeds waren uitgevoerd, zijn alleen het maatregel- en het controletraject gemonitord.

In ieder beektraject zijn hydrologische, morfologische en biologische metingen uitgevoerd (Tabel 3).

TABEL 3 HET MAATREGELEFFECTMEETSHEMA VOOR HERMEANDERINGSPROJECTEN

Parameter	Aantal monsters maatregeltraject	Aantal monsters controletraject	Meet- frequentie	Methode
<b>Beek</b>				
afvoer	2 (boven+beneden)	1	continu	meetstuw + waterhoogtelogger
stroomsnelheid	4	4	maandelijks	v-meter
dwars- en lengteprofiel	4	4	na extremen	GNSS
substraatpatroon	1 (5)	1 (5)	maandelijks	raster
korrelgrootte	2 (oever, bodem)	2 (oever, bodem)	maandelijks	steekbuis
bodemopbouw	raai	raai	1-malig	boring
veld pH, EGV, O <sub>2</sub>	1	1	maandelijks	veldmeters
waterchemie	1	1	2-maandelijks	NEN norm
macrofauna	4	4	4 voor, 4 na	Surbersampler
<b>Beekdal</b>				
inundatie = afvoer	2 (boven+beneden)	1	continu	meetstuw + waterhoogtelogger
grondwaterstand	1 raai (4)	1 raai (4)	continu	logger
porienwaterchemie	3 raaien (4)	3 raaien (4)	kwartaal	
vegetatie	3	3	8	“transect”
zaaddepositie	3	3	continu	val

KRW-kwaliteitselementen zijn bouwstenen van de ecologische waterkwaliteit. In beken is macrofauna de belangrijkste graadmeter voor hydromorfologische kwaliteit. Daarom is deze groep van ongewervelden gebruikt als indicator voor het succes van de uitgevoerde maatregelen.

#### MEETPROGRAMMA INBRENGEN DOOD HOUT

Het meetprogramma voor het inbrengen van dood hout is eveneens gestandaardiseerd uitgevoerd (Tabel 4), zodat de resultaten van alle experimenten onderling vergelijkbaar zijn en als basis kunnen dienen voor evaluatie.

Bij ieder dood houtproject is opnieuw het BACI-design gehanteerd. Niet alle dood houtprojecten konden op deze wijze worden bemonsterd. De reeds uitgevoerde projecten hebben alleen een houtinbreng- en controletraject met metingen na uitvoering van de houtinbreng (derde kolom).

**TABEL 4** HET MAATREGELEFFECTMEETSHEMA VOOR DOOD HOUTPROJECTEN

Parameter	Aantal monsters maatregeltraject	Aantal monsters controletraject	Meetfrequentie	Methode
afvoer	2	2	continu	meetstuw + waterhoogtelogger
stroomsnelheid	4	4	maandelijks	v-meter
grondwaterstand	1 raai (4)	1 raai (4)	continu	logger
dwars- en lengteprofiel	4	4	na extremen	GNSS
substraatpatroon	1 (5)	1 (5)	maandelijks	raster
korrelgrootte	2 (bodem)	2 (bodem)	maandelijks	steekbuis
veld pH, EGV, O <sub>2</sub>	1	1	maandelijks	veldmeters
waterchemie	1	1	2-maandelijks	NEN norm
macrofauna	4	4	4 voor, 4 na	Surbersampler
waterplanten	1	1	1x per jaar	“transect”

## 3

## VOORBEELDEN RESULTATEN

## 3.1 HYDROLOGIE EN MORFOLOGIE

## 3.1.1 INTRODUCTIE

Het tweefasenprofiel wordt veel toegepast bij beekherstelprojecten. Bij een tweefasenprofiel wordt naast het gebruikelijke zomerbed ook een inundatiezone gecreëerd (verlaagd winterbed). Tijdens hoogwatersituaties wordt water geborgen in de inundatiezone (WB21-doelstelling). Daarnaast leidt het bergen van water tot het aftoppen van de afvoerpiek. Dit leidt tot een gedempte dynamiek in de afvoer, waarbij de aquatische ecologie is gebaat (KRW-doelstelling).

De kerndoelstelling van het project Beekdalbreed Hermeanderen was “het creëren van een gedempte dynamiek in de afvoer en het waarborgen van een grote morfologische variatie”. In het hydrologische en morfologisch onderzoek is nagegaan of de toepassing van het tweefasenprofiel leidt tot dergelijke gewenste gedempte dynamiek in de afvoer en grote morfologische variatie. Het hydrologische en morfologisch onderzoek is uitgevoerd in de volgende vier beken: Hagmolenbeek, Hooge Raam, Lunterse Beek en Tungelroyse Beek. Het gaat daarbij om drie traditionele beekherstelprojecten (ook wel hermeanderingsprojecten genoemd) waarbij een meanderende loop is aangelegd (te weten de Hagmolenbeek, de Lunterse Beek en de Tungelroyse Beek) en één project waarbij een rechte loop is aangelegd (de Hooge Raam). Het doel van het laatste project was om initiatie van meandering te onderzoeken. In Tabel 5 zijn de ontwerpkenmerken van deze 4 projecten opgenomen.

TABEL 5 ONTWERPKENMERKEN VAN DE 4 HYDROLOGISCH EN MORFOLOGISCH ONDERZOCHE BEKEN

Beek	Boven-breedte (m)	Onder-breedte (m)	Diepte (m)	Verhang (m/km)	Talud oever (1:x)	Talud inundatiezone (1:x)
Hagmolenbeek	1.6	0.8	0.40	0.56	1	50
Hooge Raam	7.5	6.5	0.50	1.8	1	7
Lunterse beek	6.0	3.6	0.40	0.94	3	380
Tungelroyse beek	12.0	6.0	1.4	0.24	2.2	80

## 3.1.2 HYDROLOGISCHE METINGEN

De hydrologische metingen hebben tot doel de dynamiek in de afvoer te kwantificeren. Bij elk project is daarom, bij een meetstuw, de afvoer gemeten. Met behulp van een druksensor is de waterstand ter hoogte van de meetstuw continu gemeten. Door middel van een theoretische relatie tussen waterstand en afvoer, is de afvoer berekend uit de waterstand. Ook tijdens alle andere projecten binnen het onderzoek is de waterstand continu gemeten.

Met behulp van morfologische data is de waterdiepte bepaald ter hoogte van het waterstandsmeetpunt. Van zowel de afvoer als de waterdiepte is de cumulatieve frequentiecurve (CFC) bepaald. Een CFC laat zien hoeveel tijd van het jaar een bepaalde afvoer/waterdiepte wordt

overschreden. In het geval van de waterdiepte is ook bepaald hoeveel dagen per jaar de inundatiezone is gebruikt voor het bergen van water. De vorm van de CFC geeft een indicatie van de dynamiek van de afvoer/waterdiepte. De dynamiek neemt toe bij toenemende helling van de CFC. Tabel 6 laat de meetperioden zien van de afvoer en de waterdiepte.

TABEL 6

KARAKTERISTIEKEN HYDROLOGISCHE MONITORING BEEKHERSTELPROJECTEN

	Monitoringsperiode (afvoer)	Monitoringsperiode (waterdiepte)
Hagmolenbeek	juni 2010 – juni 2012	december 2010 – april 2012
Hooge Raam	januari 2010 – augustus 2012	juni 2011 – juli 2012
Lunterse beek	januari 2012 – augustus 2012	januari 2012 – juli 2012
Tungelroyse beek	mei 2011 – augustus 2012	mei 2011 – mei 2012

### 3.1.3 MORFOLOGISCHE METINGEN

De morfologie van de vier beken is vanaf de aanleg gemonitord. Er is gebruik gemaakt van GPS-apparatuur van het type Leica GPS 1200+. Met deze apparatuur kan met een nauwkeurigheid van 1-2 cm in de horizontaal en verticaal een punt in de ruimte (x-y-z) worden gemeten. Deze nauwkeurigheid leent zich goed om morfologische verschillen in laaglandbeken in beeld te brengen. Er is op twee verschillende manieren gemeten. In de traditionele beekherstelprojecten is met een frequentie van een keer per 3 maanden gemeten. Er zijn bij elke meting 42-72 dwarsraaien ingemeten over een beeklengte van 370-425 meter. De afstand tussen de dwarsraaien varieert tussen 6,5 en 7,2 m, waarbij in bochten de afstand tussen de dwarsraaien kleiner is dan in de rechte stukken. De details van de morfologische monitoring per beek zijn te vinden in Tabel 7.

Bij de Hooge Raam en het benedenstroomse deel van de Lunterse Beek is een andere methode toegepast. Aangezien in deze projecten de morfologische veranderingen op een veel kleinere tijdschaal plaatsvonden is de frequentie verhoogd naar een keer per 1,5-2 maanden. Ook hier is in dwarsraaien gemeten. De afstand tussen de dwarsraaien varieerde tussen de 2,7 en 3,5 m. Deze twee projecten worden in het vervolg aangeduid als gedetailleerde projecten. Omdat de resolutie van gedetailleerde projecten veel hoger is dan bij de traditionele projecten, is het mogelijk om de data te interpoleren op een grid. Bij de Hooge Raam is gebruik gemaakt van een grid met een grootte van 0,20 m en bij de Lunterse Beek van 0,25 m. De data zijn geïnterpoleerd met de methode 'Natural Neighbour'. Omdat de data zijn verworven in dwarsraaien is er gebruik gemaakt van een anisotropie factor van 4 voor de Hooge Raam en 1,5 voor de Lunterse Beek. Door middel van deze factor is het invloedsgebied in de lengterichting groter dan in de dwarsrichting. Er wordt niet in een cirkel rond een gridpunt gezocht naar gemeten data, maar in een ovaal. Dit levert meer realistische interpolaties op.

Van elke meting, tijdens zowel de traditionele als de gedetailleerde projecten, is het lengteprofiel van de bodem van de beek bepaald. Dit is gedaan door van elke dwarsraai de gemiddelde bodemhoogte te bepalen, waarbij de bodem is aangeduid als het gebied tussen de twee onderinsteken. Van de lengteprofielen is het verhang bepaald met behulp van een lineaire fit. Bij de traditionele projecten worden dwarsraaien in bochten en rechte stukken met elkaar vergeleken. Bij de gedetailleerde projecten geven de geïnterpoleerde data een indruk van de morfologie in een bovenaanzicht.

TABEL 7 KARAKTERISTIEKEN MORFOLOGISCHE MONITORING BEEKHERSTELPROJECTEN

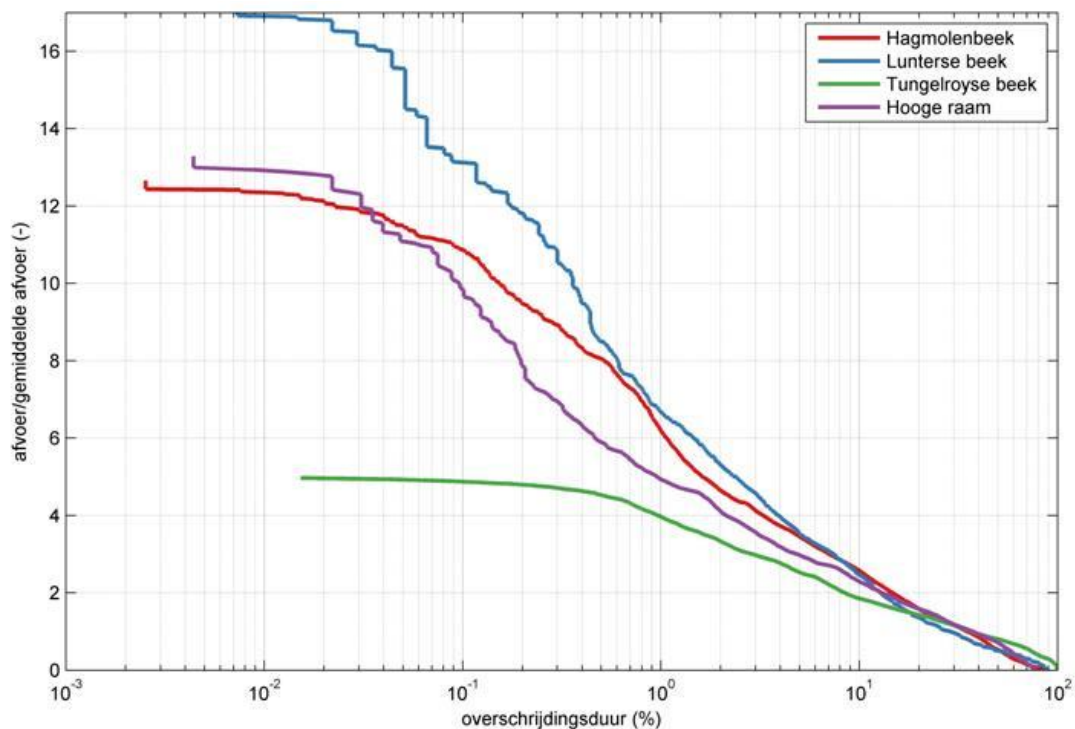
Beek	Type	Monitoringsperiode	Meetfrequentie (1 keer per x maanden)	Lengte onderzoeksgebied (m)	Afstand tussen dwarsraaien (m)
Hagmolenbeek	Traditioneel	juni 2010 – juni 2012	3	425	6.7
Hooge Raam	Gedetailleerd	september 2009 – juni 2012	1.8	600	2.7
Lunterse beek	Traditioneel/ gedetailleerd	oktober 2011 – juni 2012	3/1.5	370/170	7.2/3.5
Tungelroyse beek	Traditioneel	juni 2011 – juni 2012	3	380	6.6

### 3.1.4 HYDROLOGISCHE PROCESSEN

Figuur 1 laat de afvoerduurlijn zien van alle 4 projecten. Op de x-as staat het percentage van de tijd dat een bepaalde afvoer wordt overschreden. De x-as is afgebeeld op logschaal, waarmee het verschil tussen de lijnen duidelijker in beeld wordt gebracht. Op de y-as staat de daarbij horende afvoer, gedeeld door de gemiddelde afvoer. De afvoer is gedeeld door de gemiddelde afvoer om de verschillende afvoerduurlijnen beter met elkaar te kunnen vergelijken.

In Tabel 8 zijn afvoerstatistieken weergegeven, met daarin de gemiddelde afvoer, jaarlijkse piekafvoer en de verhouding tussen beide variabelen. Deze verhouding is een maat voor de dynamiek van de afvoer. De dynamiek van de afvoer is ook terug te zien in Figuur 1. Hoe groter de helling, hoe groter de dynamiek. Uit zowel het figuur als de tabel blijkt dat de Lunterse Beek de grootste dynamiek in de afvoer laat zien. De Tungelroyse Beek laat de kleinste dynamiek in de afvoer zien.

FIGUUR 1 AFVOERDUURLIJN VAN ALLE 4 PROJECTEN





TABEL 8

## AFVOERKARAKTERISTIEKEN

Beek	Gemiddelde afvoer (m <sup>3</sup> /s)	Jaarlijkse piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)	Jaarlijkse piekafvoer/ gemiddelde afvoer (-)
Hagmolenbeek	0.46	5.64	12.3
Hooge Raam	0.17	2.25	13.2
Lunterse beek	0.33	5.54	16.8
Tungelroyse beek	1.01	5.00	4.95

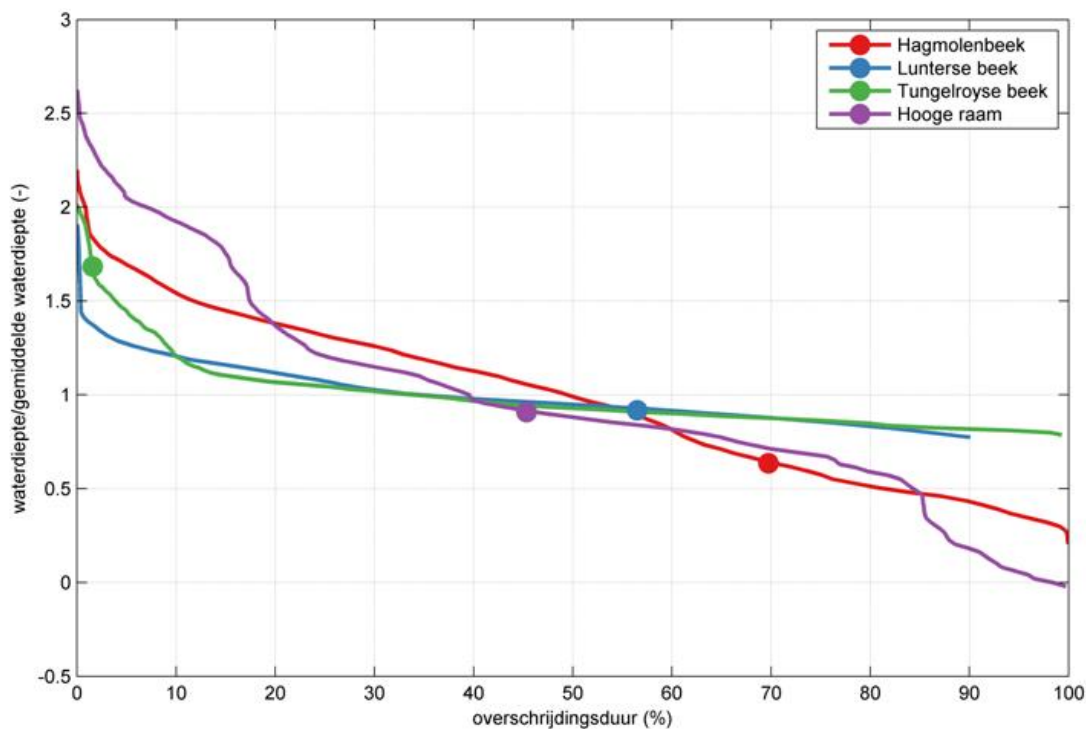
Dynamiek in de afvoer werkt door in de dynamiek in de waterdiepte. De dynamiek van de waterdiepte geeft een indicatie of de getroffen maatregelen leiden tot een gedempte dynamiek. Figuur 2 laat de CFC van de waterdiepte zien. Op de x-as staat het percentage van de tijd dat een bepaalde waterdiepte wordt overschreden. Op de y-as staat de daarbij horende waterdiepte, gedeeld door de gemiddelde waterdiepte. Met cirkels is aangegeven bij welke waterdiepte het winterbed inundeert.

Ook hier beschrijft de vorm van de CFC de dynamiek van de waterdiepte. De Hooge Raam laat de grootste dynamiek in waterdiepte zien, gevolgd door de Hagmolenbeek; beide CFC's hebben een relatief grote helling. De dynamiek van de Lunterse Beek en Tungelroyse Beek zijn vergelijkbaar en veel lager dan de andere twee beken. Dit is opvallend aangezien uit de afvoeranalyse blijkt dat de Lunterse Beek de grootste dynamiek bevat.

In Tabel 5 is de overschrijdingsduur van de inundatiezones weergegeven. Naast de gemeten waarden zijn ook de ontwerpwaarden opgenomen. Bij de Hooge Raam is niet gerekend aan de inundatieduur. Bij de andere projecten is dat wel. Er blijkt dat de werkelijke inundatieduur van de Hagmolenbeek veel groter is dan berekend. Bij de Lunterse Beek en Tungelroyse Beek komt de inundatieduur overeen met de ontwerpwaarden.

FIGUUR 2

## WATERDIEPTE CFC VAN ALLE 4 PROJECTEN



TABEL 5

WATERSTANDSKARAKTERISTIEKEN

Beek	Overschrijdingsuur inundatiezone (%)	Overschrijdingsduur inundatiezone (dagen/jaar)	Ontwerp inundatieduur (dagen/jaar)
Hagmolenbeek	69.7	255	10-20
Hooge Raam	45.3	165	-
Lunterse beek	56.5	206	160
Tungelroyse beek	1.6	6	0

### 3.1.5 MORFOLOGISCHE PROCESSEN

Figuur 3 laat de morfologische lengteprofielen zien van de vier beken. In alle figuren is met rood het initiële profiel aangegeven. Alle beken laten verschillen zien in de morfologische ontwikkeling van het lengteprofiel.

Bij de Hagmolenbeek valt op dat er tussen 200 m en 250 m een diepe kuil is opgevuld met sediment. Dit is ter hoogte van een brug waar de beek nog voor een klein deel door de oude gekanaliseerde loop stroomde. Daarnaast vindt veel bodemerosie plaats rond 170 m vanaf het begin van de beek. Dit is in een bocht waar veel morfologische dynamiek is opgetreden. De rest van het onderzoeksgebied laat weinig veranderingen zien in het lengteprofiel. Het verhang is constant gebleven over de meetperiode en heeft een waarde van ongeveer 0,7 m/km. Bij de Lunterse Beek hebben met name in het benedenstroomse deel van het onderzoeksgebied veel morfologische veranderingen plaatsgevonden. Initieel was de beek in een nagenoeg rechte lijn gegraven met een verhang van ongeveer 0,9 m/km. Dit verhang is in de loop van de tijd afgenomen naar ongeveer 0,2 m/km. De voornaamste oorzaak is dat in het benedenstroomse deel van het onderzoekstraject veel morfologische activiteit heeft plaatsgevonden. Bij de gedetailleerde morfologische metingen wordt hier verder op ingegaan. Maar ook bovenstrooms is de beek op een aantal plaatsen geërodeerd. Door de benedenstroomse sedimentatie heeft dit geleid tot een afname van het verhang.

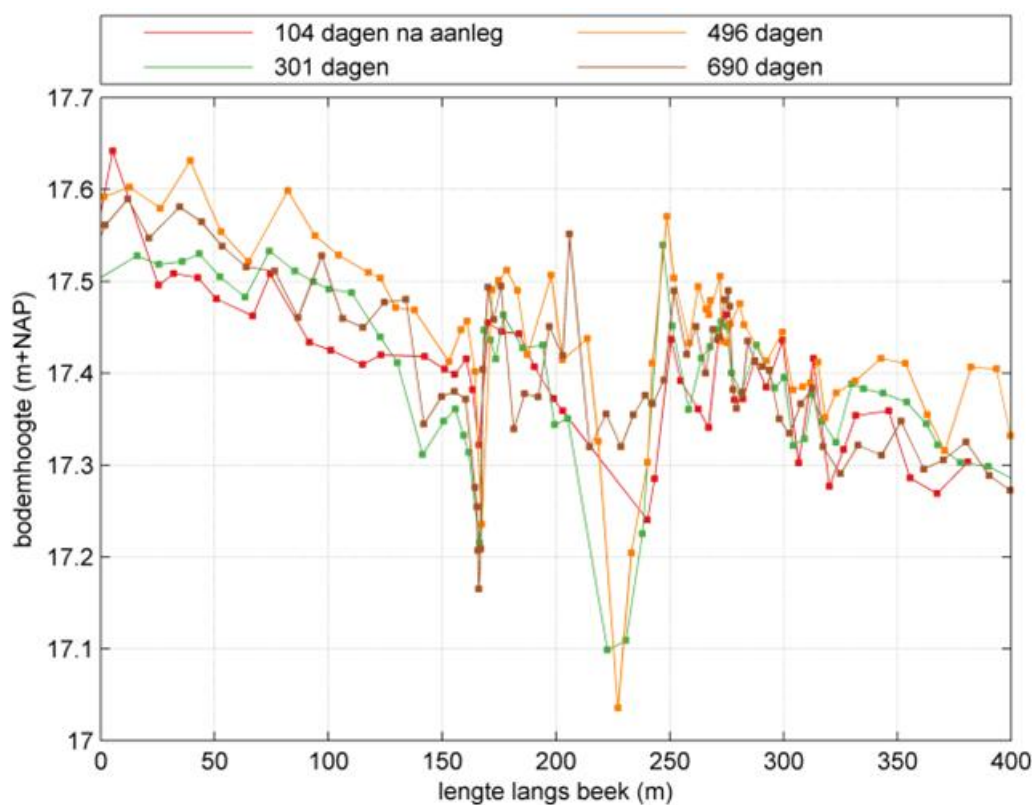
De Tungelroyse Beek laat de minste morfologische veranderingen zien van alle onderzochte beekherstelprojecten. Initieel had het lengteprofiel van de beek een grillig verloop, waarbij lokaal hoogte verschillen tot een halve meter over tientallen meter beeklengte voorkwamen. Dit grillige verloop was bij de laatste meting nog aanwezig. Het verhang van het onderzoekstraject was bij aanleg nihil. In de loop van de tijd is het verhang iets toegenomen en had bij de laatste meting een waarde van 0,1 m/km.

In de Hooge Raam zijn de morfologische veranderingen beter te verklaren dan bij de andere projecten. Initieel had het onderzoekstraject een verhang van 1,8 m/km. Dit is na ruim 2,5 jaar gehalveerd tot 0,9 m/km. De voornaamste reden hiervoor is dat er benedenstrooms van het onderzoekstraject een deel van de beek is vergraven met een veel kleiner dwarsprofiel. De combinatie van de aanwezigheid van bochten en het vernauwen van het dwarsprofiel heeft voor een opstuwend effect gezorgd van de waterstanden in het onderzoekstraject. In het bovenstroomse deel van het onderzoekstraject is direct na aanleg veel vegetatie ontstaan. Dit heeft ervoor gezorgd dat delen van de beek ook zijn versmald. Hierdoor is plaatselijk de stroomsnelheid toegenomen en zijn diepe erosiekuilen ontstaan. De opstuwung heeft met name in het benedenstroomse deel van het onderzoekstraject invloed op de waterstanden (verhoging) en stroomsnelheden (verlaging). De verlaging van de stroomsnelheden in dit deel van de beek heeft ervoor gezorgd dat het vrijgekomen sediment bovenstrooms in het benedenstroomse deel is gesedimenteerd. Dit heeft tot de afname van het verhang geleid.

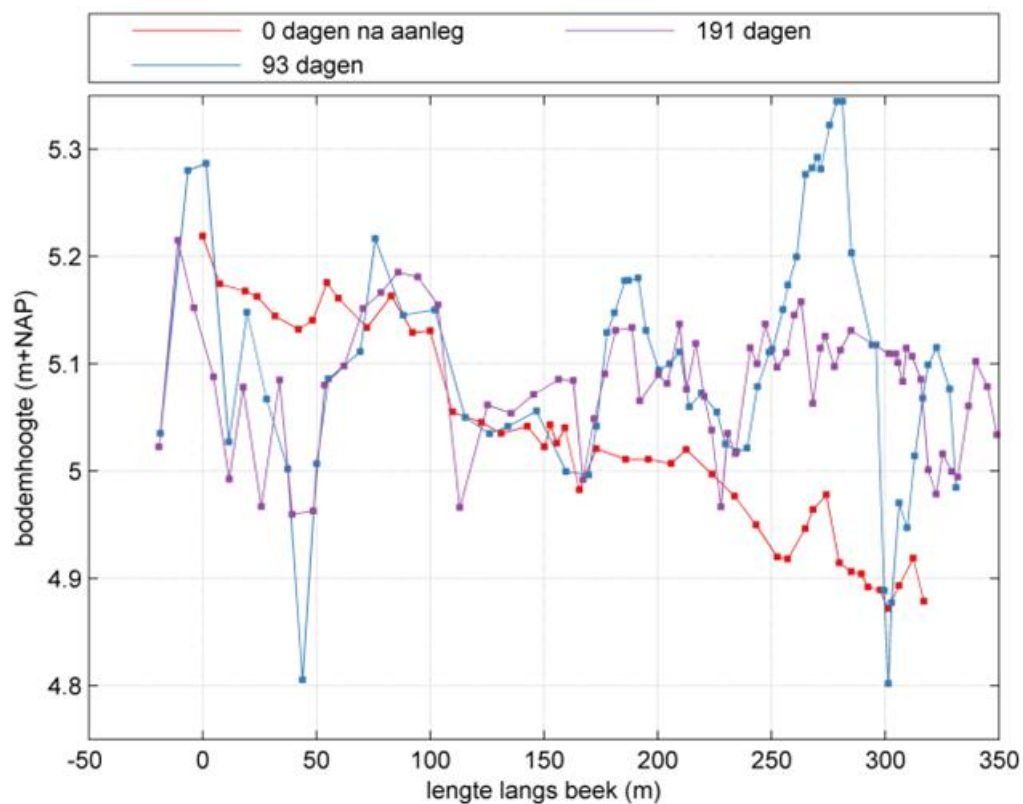
FIGUUR 3

LENGTEPROFIELEN VAN DE BODEMLIGGING VAN DE HAGMOLENBEEK, DE LUNTERSE BEEK, DE TUNGELROYSE BEEK EN DE HOOGHE RAAM.  
VOOR ALLE FIGUREN GELDT DAT WATER VAN LINKS NAAR RECHTS STROOMT

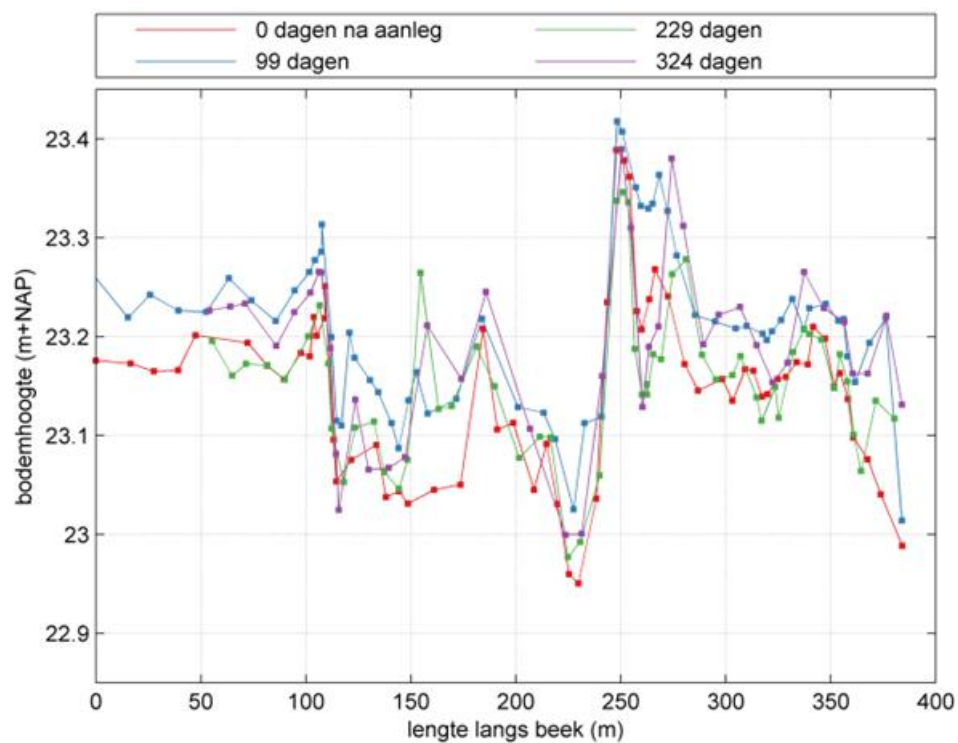
## HAGMOLENBEEK



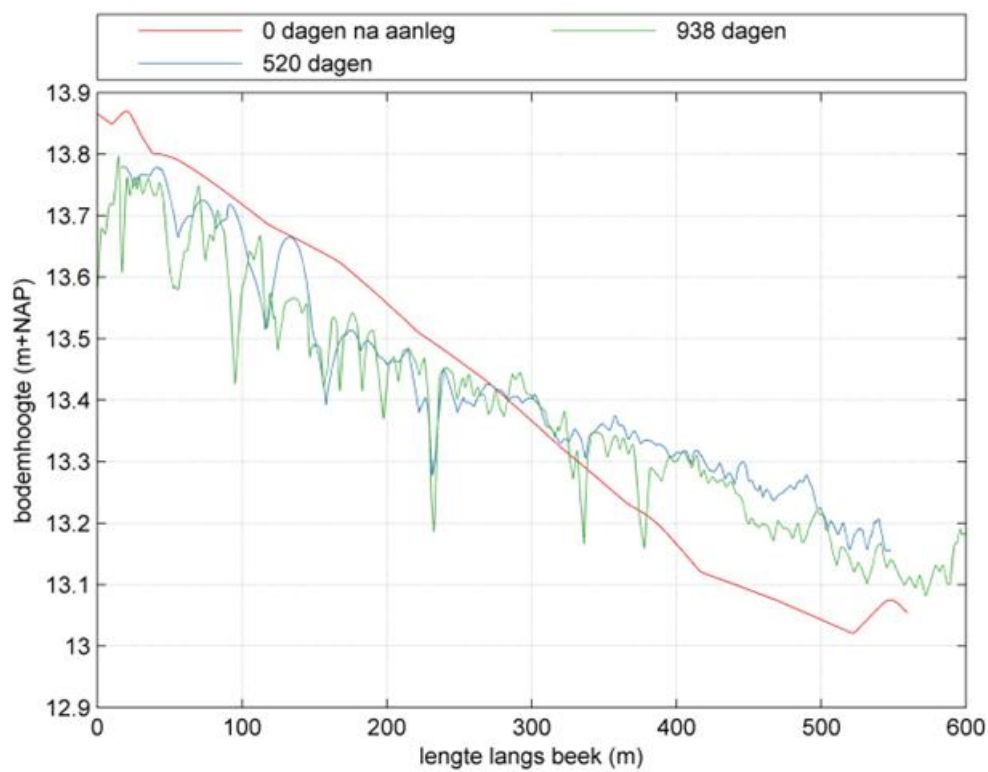
## LUNTERSE BEEK



## TUNGELROYSE BEEK



## HOOGE RAAM



In Figuur 4 zijn dwarsprofielen van de drie traditionele projecten afgebeeld, met daarbij twee dwarsprofielen in bochten (A en B) en 2 in rechte delen (C en D). Over het algemeen vinden de grootste morfologische veranderingen in de bochten plaats.

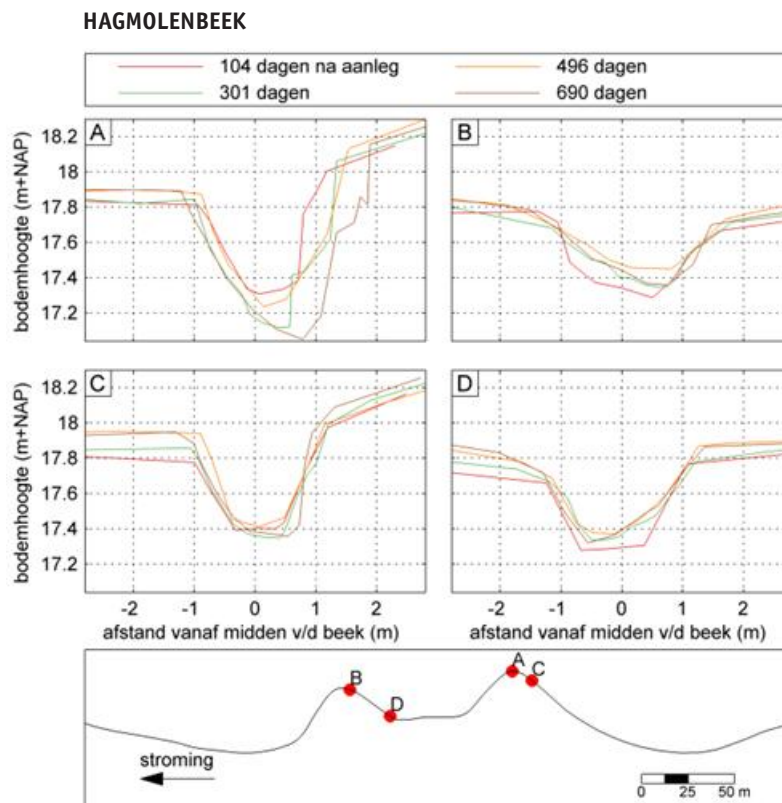
In de Hagmolenbeek is de oever in bocht A met ruim 1 meter geërodeerd. Ook is in dit figuur goed te zien dat de beek ter hoogte van deze bocht is ingesneden, zoals dat ook al te zien is in Figuur 3. In bocht B is minder morfologische activiteit waarneembaar. Het profiel heeft zich hier iets aangepast in de binnenbocht, waar aanzanding heeft plaatsgevonden. In de rechte delen van de Hagmolenbeek heeft vrijwel geen morfologische verandering plaatsgevonden.

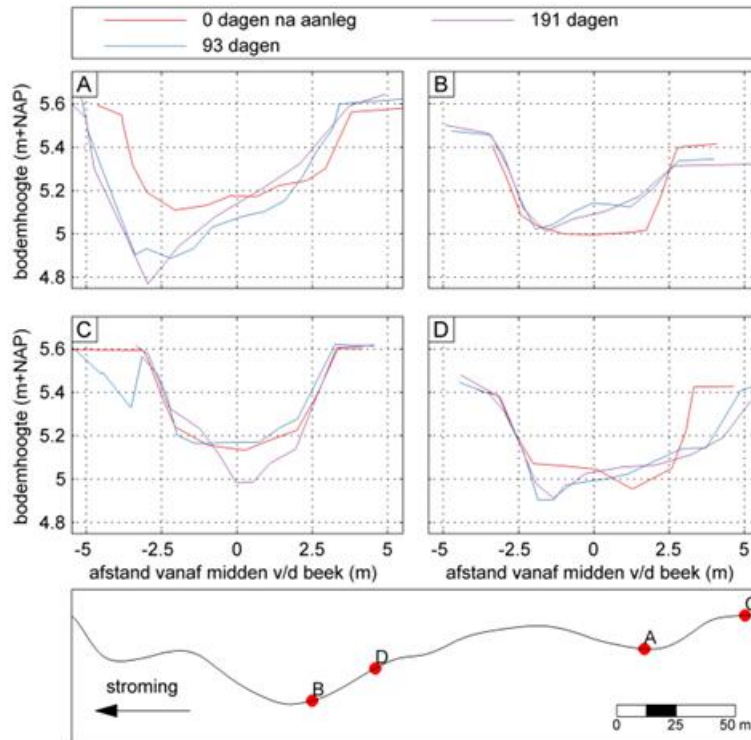
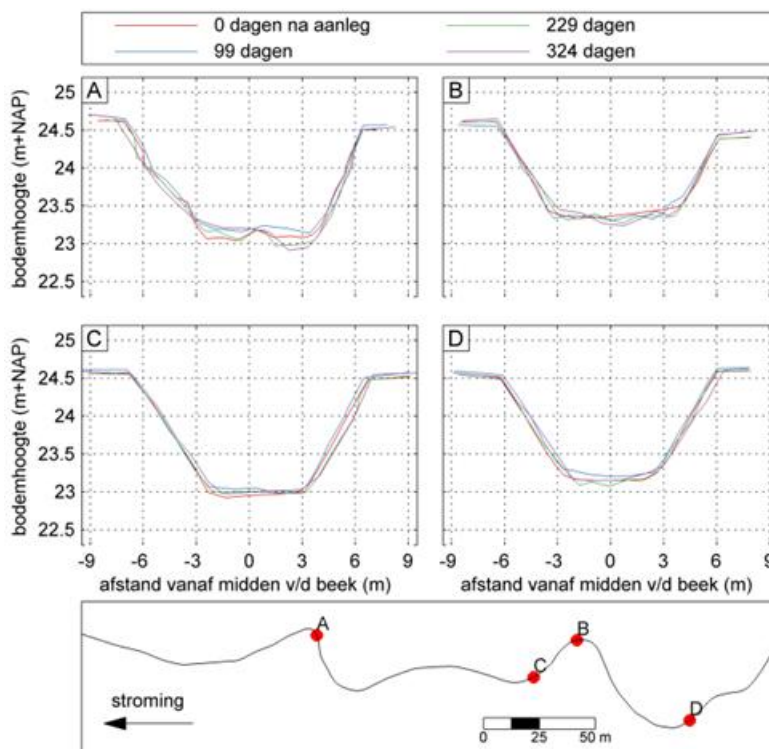
De dwarsprofielen van de Lunterse Beek laten hetzelfde beeld zien als de Hagmolenbeek. Ook hier is in bocht A veel oevererosie te zien, waarbij meer dan 1 m oever is geërodeerd. In bocht B is geen oevererosie te zien, maar wel aanzanding in de binnenbocht. Bij de dwarsprofielen van de rechte stukken is in tegenstelling tot de Hagmolenbeek wel morfologische activiteit waarneembaar, met insnijding (C) en verbreding (D).

Zoals uit de lengteprofielen ook al naar voren kwam, is in de Tungelroyse Beek weinig tot geen morfologische activiteit waarneembaar. Zowel in de bochten als in de rechte stukken zijn de profielen nog precies hetzelfde als bij aanleg.

FIGUUR 4

MORFOLOGISCHE DWARSPROFIELN VAN DE HAGMOLENBEEK, LUNTERSE BEEK EN TUNGELROYSE BEEK



**LUNTERSE BEEK****TUNGELROYSE BEEK**

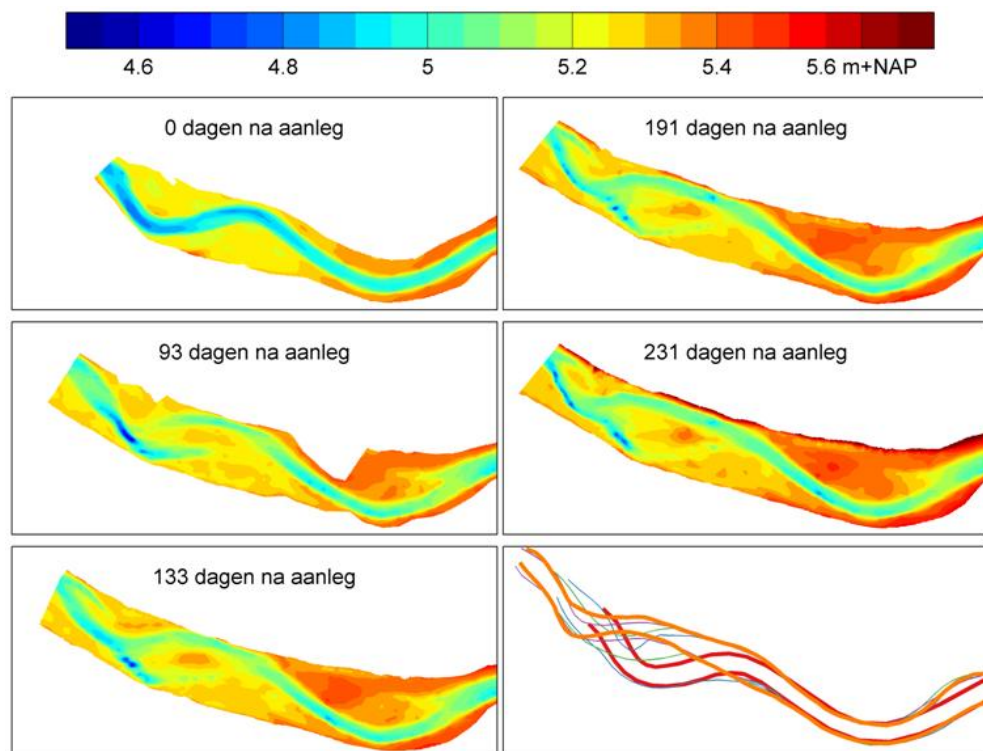


Zoals al eerder opgemerkt is er bij de Lunterse Beek in het benedenstroomse deel van het onderzoekstraject meer morfologische activiteit dan bij de twee overige traditionele projecten. Dit bleek 3 maanden na aanleg. Zowel de meetfrequentie als het detailniveau zijn verhoogd om de processen beter in beeld te brengen. Figuur 5 laat het resultaat zien van vijf opeenvolgende metingen. Net na aanleg was er een regelmatige meander te zien. Drie maanden later was de meest benedenstroomse bocht gedeeltelijk afgesneden. De oude loop was toen ook al bijna opgevuld met sediment. Dit proces heeft zich verder ontwikkeld, waarbij de bocht zich nog verder in benedenstroomse richting heeft verplaatst. Daarnaast is de afgesneden loop verder aangezand.

De huidige loop volgt nu voor een deel de oude gekanaliseerde loop. De oude gekanaliseerde loop is net na aanleg van de meander opgevuld met sediment dat vrij is gekomen bij de graafwerkzaamheden. Aangezien het opvullen van oude lopen vaak een slechte pakking tot gevolg heeft, is deze vatbaar voor erosie. Hierdoor is het mogelijk de beek zich heeft ontwikkeld in de richting van de oude gekanaliseerde loop. Een andere oorzaak zou kunnen zijn dat de meandergolfenlengte van de gegraven meander niet past bij dit type waterloop. Een waterloop wordt getypeerd door het verhang, de breedte en de diepte van de beek, waar theoretisch een typische meandergolfenlengte voor kan worden afgeleid. Een waterloop ontwikkelt zich naar een dynamisch morfologisch evenwicht, waarbij deze intrinsieke meandergolfenlengte een belangrijke rol speelt. Er wordt verder onderzoek gedaan naar de oorzaak van deze morfologische aanpassing.

FIGUUR 5

MORFOLOGISCHE VERANDERINGEN BENEDENSTROOMSE DEEL VAN DE LUNTERSE BEEK. WATER STROOMT VAN RECHTS NAAR LINKS

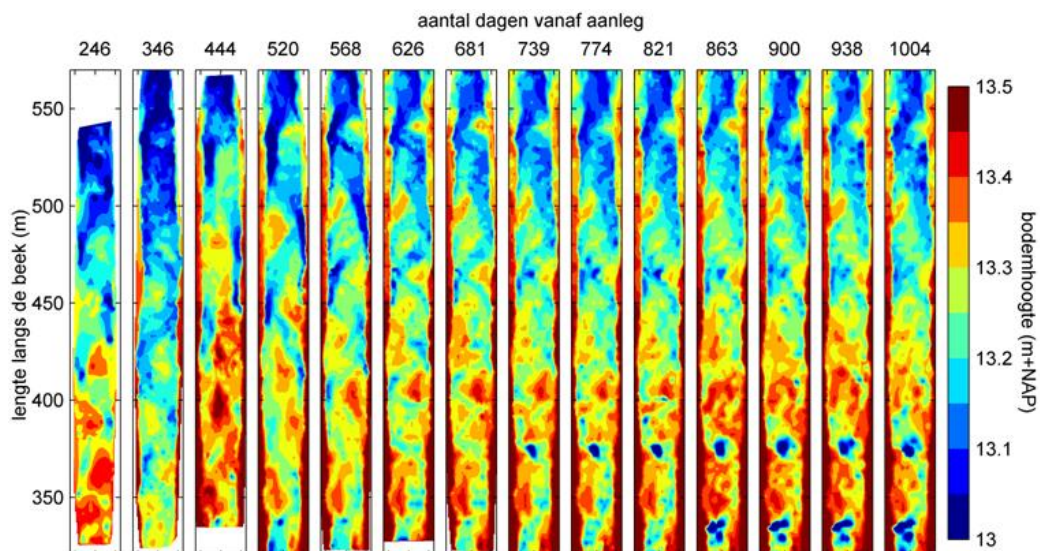


Het onderzoek in de Hooge Raam was gericht op de initiatie van meandering. Uit de wetenschappelijke literatuur blijkt dat alternerende rivierbanken een grote rol wordt toegedicht bij het ontstaan van meanders. De morfologische monitoring was daarom onder andere gericht op het in beeld brengen van deze alternerende rivierbanken. Ongeveer 8 maanden na de start van het experiment zijn deze banken voor het eerst ingemeten. In de eerste meting is al een duidelijk regelmatig alternerend patroon waar te nemen. Dit regelmatige patroon blijft zichtbaar tot ongeveer 520 dagen na aanleg. Hierna worden de individuele banken moeilijker waar te nemen, waarbij in de laatste metingen geen sprake meer is van een regelmatig patroon.

De karakteristieken van de individuele rivierbanken zijn bepaald om een beter beeld te krijgen van de morfologische ontwikkeling. In totaal zijn zes banken in elke meting waarneembaar. Van deze zes banken zijn de golflengte, amplitude en de migratiesnelheid bepaald. Deze karakteristieken zijn bepaald uit de lengteprofielen van de linker- en rechterkant van de beek. De lengteprofielen hebben de vorm van een sinus. Hierdoor zijn de banktop en het bankdal eenvoudig af te leiden uit de data. De golflengte is bepaald uit de afstand tussen de bankdalen van twee opeenvolgende rivierbanken. De amplitude is het verschil tussen de banktop en het bankdal. De migratiesnelheid is bepaald door de verplaatsingsafstand van de rivierbank te delen door het aantal dagen tussen de individuele metingen.

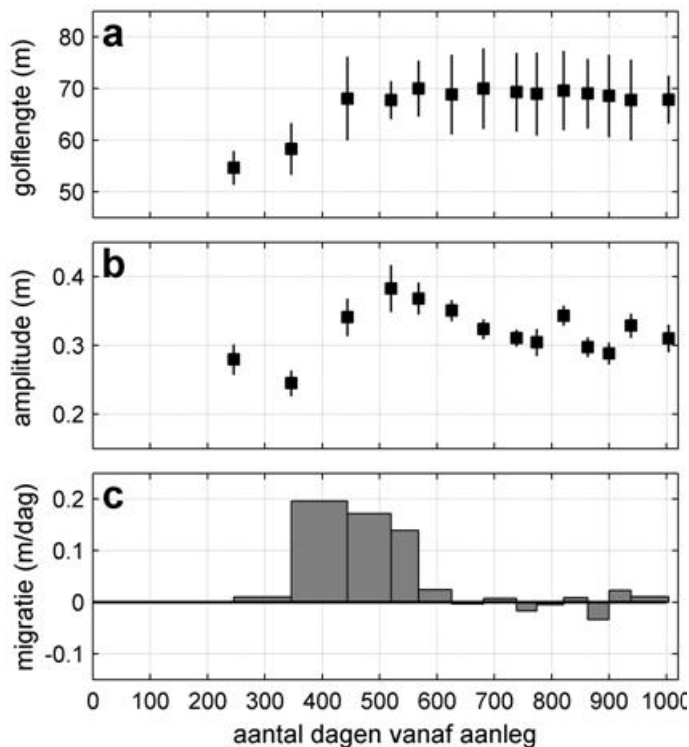
Figuur 5 laat deze karakteristieken zien. De golflengte kent een stijgende trend tot de vierde en vijfde meting. Hierna is een evenwichtsgolflengte ontstaan met een gemiddelde waarde van 68 m. De amplitude daalde tussen de eerste en de tweede meting. Daarna is een stijgende trend waarneembaar, tot meting vier, waarna er een dalende trend is te zien. De rivierbanken migreerden tussen de tweede en vijfde meting, met een gemiddelde migratiesnelheid van 0,17 m/dag.

FIGUUR 6 MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING VAN HET BENEDENSTROOMSE DEEL VAN DE HOOGHE RAAM. WATER STROOMT VAN BENEDEN NAAR BOVEN





FIGUUR 7 KARAKTERISTIEKEN VAN DE ALTERNERENDE RIVIERBANKEN IN DE HOOGTE RAAM, MET DAARBIJ (A) GOLFLENGTE, (B) AMPLITUDE EN (C) MIGRATIESNELHEID



### 3.2 BEEKBEGELEIDENDE VEGETATIES

#### 3.2.1 INTRODUCTIE

Een belangrijk doel van beekdalherstel is de terugkeer van zeldzame en bijzondere plantensoorten en een verhoging van biodiversiteit. Door innovatieve sturing op de hydromorfologie van beek en beekdal is in dit project beoogd om de omgevingscondities voor typische beekdalsoorten te verbeteren. Deze veranderingen in hydromorfologie waren vooral gericht op het creëren van een hydrologische gradiënt in het beekdal, met ruimte voor overstroming en een meer gedempte stromingsdynamiek van de beek door het jaar heen.

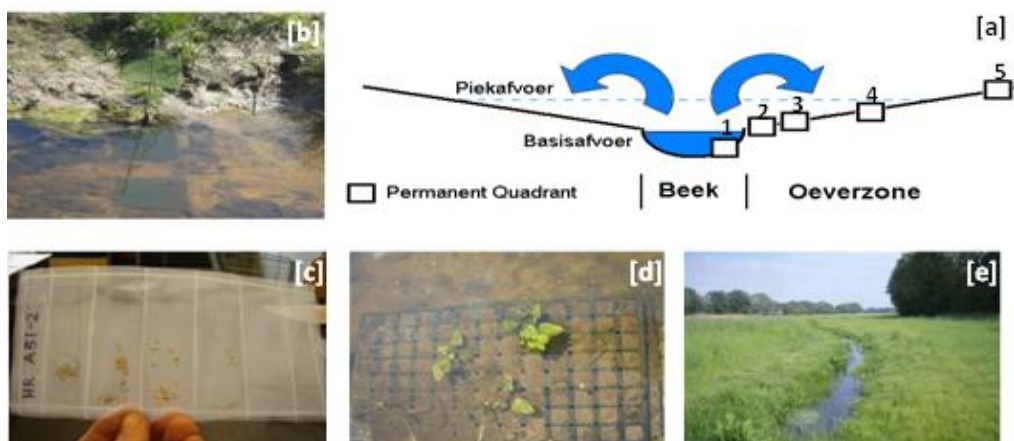
Het vegetatie-onderzoek richtte zich op de processen die een rol spelen bij de ontwikkeling van plantendiversiteit na beekherstel. Door naar alle processen te kijken die een rol spelen in de kolonisatie door planten en de ontwikkeling van de vegetatie, kunnen eventuele knelpunten worden geïdentificeerd. Dit maakt het mogelijk om toekomstige herstelmaatregelen waar nodig nog verder te verbeteren. Stap voor stap zijn deze processen: aankomst van plantenzaden (zaaddepositie), kieming van de zaden, overleving van de zaailingen en vestiging van de jonge planten. Specifiek is gekeken naar hoe deze processen worden beïnvloed door de nieuwe hydrologische condities. Om dit te onderzoeken, is bij de herstelde beken veldonderzoek uitgevoerd langs een hydrologische gradiënt van in de beek naar hoog op de oever. Daar vond monitoring van hydrologie en vegetatie plaats, evenals enkele veldexperimenten. Deze experimenten besloegen het meten van de natuurlijke zaaddepositie en het onderzoeken van kieming, zaailingoverleving van een aantal representatieve oersoorten. De monitoring bestond uit vegetatie opnames van permanente plots van direct na herstel tot aan augustus 2012.

### 3.2.2 HET VEGETATIEONDERZOEK

Het vegetatieonderzoek is uitgevoerd bij de hermeanderingsprojecten binnen Beekdalbreed Hermeanderen. Bij alle beken is langs een hydrologische gradiënt onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van de vegetatie. Bij een aantal beken is in meer detail gekeken naar zaaddepositie, kieming en zaailingoverleving. De opzet van het veldonderzoek bestond uit drie transecten langs een vochtgradiënt (loodrecht op de stroomrichting van de beek) met in ieder transect vijf permanente plots (50x25 cm) (Figuur 8). Het onderste plot was altijd overstroomd, dus onder het zomer-waterpeil van de beek. Het bovenste plot was zo hoog op de oever dat het nooit zou overstromen (Figuur 8). Bij ieder plot zijn zaadvallen geplaatst die in oktober en april werden geleegd, zodat zaaddepositie in de zomerperiode (april-oktober) en winterperiode (oktober-april) kon worden onderzocht. Van mei tot augustus 2011 en 2012 is een kieming- en zaailingoverlevingsexperiment uitgevoerd in deze plots, door zaden en kiemplanten aan te brengen in het veld (Figuur 8). In augustus 2011 en 2012 zijn vegetatieopnames gemaakt volgens de Braun-Blanquet-methode. Verder is de oppervlaktewaterstand in de beek ieder uur gemeten met behulp van druksensoren en zijn bij ieder plot grondwaterstanden en bodemvochtgehaltes in de bovenste 10 cm van de bodem gemeten (ook ieder uur, met druksensoren en diëlectrische geleidbaarheid sensoren).

FIGUUR 8

ONDERZOEKSOPZET VEGETATIE-ONDERZOEK, MET [A] 5 PLOTS IN EEN HYDROLOGISCHE GRADIËNT EN BIJ IEDER PLOT ONDERZOEK NAAR [B] ZAADDEPOSITIE, [C] KIEMING, [D] ZAAILING OVERLEVING, EN [E] MONITORING VAN VEGETATIE



#### 3.2.3 ZAADDEPOSITIE

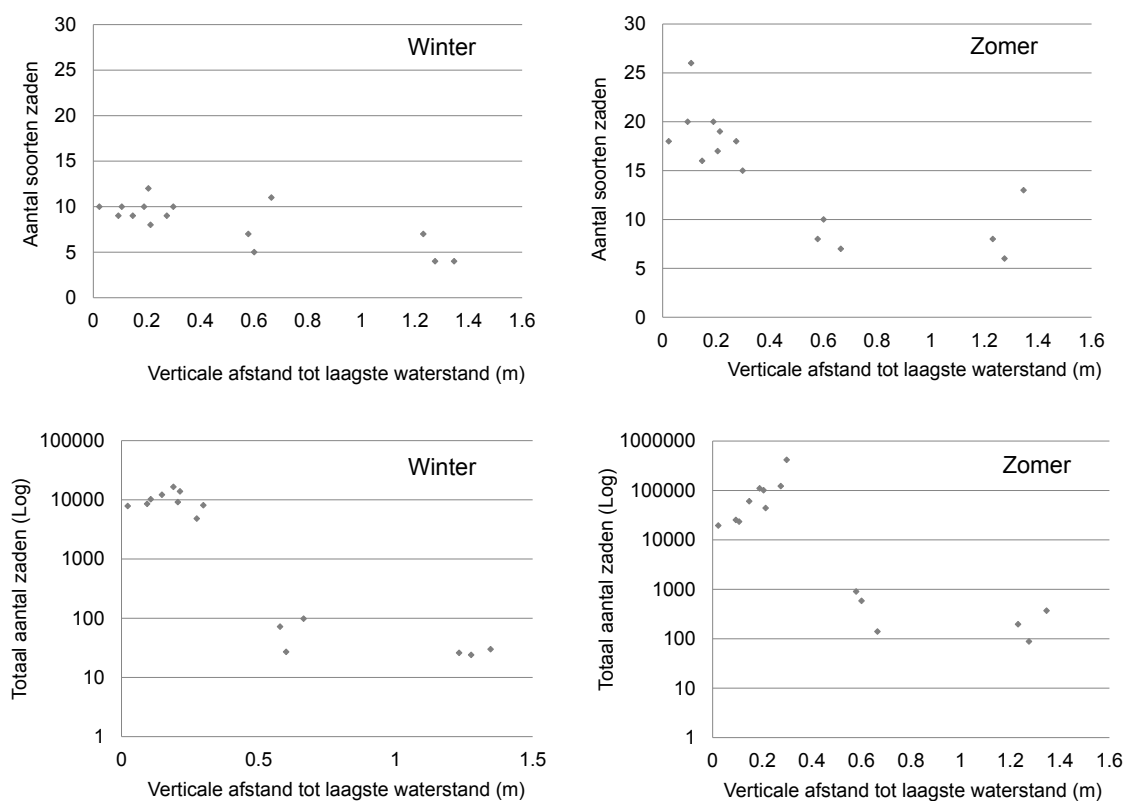
De uitkomsten van het onderzoek worden eerst beschreven per proces (stap voor stap), waarna conclusies en aanbevelingen voor alle stappen samen worden geformuleerd.

De Hagmolenbeek werd als eerste opgeleverd, daarvan kunnen we de resultaten nu presenteren. Direct na oplevering komen dicht bij de beek meer zaden binnen dan hoger op de oever (Figuur 9). Ook komen dicht bij de beek zaden van meer verschillende plantensoorten binnen (Figuur 9). Analyse van overstromingsduur- en frequentie laat zien dat in de eerste winter na oplevering veruit de meeste zaden (en soorten) het gebied binnenkomen door overstromend beekwater. Daarbinnen geldt dat veel zaden op de ondiepste plaatsen door het water worden afgezet, de meeste in het vloedmerk (Figuur 10). In de eerste zomer komen beduidend meer zaden het gebied binnen dan in de winter en speelt ook windverspreiding van zaden een grotere rol (Figuur 9). Echter, de meeste zaden worden nog steeds in de overstromingszone afgezet. Zaadverspreiding via water lijkt dus een belangrijk proces in de ontwikkeling van oeervegetatie. In de eerste 1,5 jaar na herstel van de Hagmolenbeek zijn in het onderzoeksgebied zaden neergekomen van tenminste 46 plantensoorten (Tabel 6). Van deze soorten

zijn er respectievelijk veertien en achttien soorten teruggevonden in de zich ontwikkelende vegetatie in de permanente plots in augustus 2011 en augustus 2012. Dit betekent dat lang niet alle zaden die binnenkomen daadwerkelijk bijdragen aan de vegetatie. Hoe dit komt, is in de volgende stappen verder onderzocht.

Ten aanzien van beekherstel betekent het bovenstaande dat, na herstelprojecten, de meeste zaden het gebied binnenkomen via het beekwater. Bovenstroomse bronpopulaties langs de beek zullen dus grotendeels bepalen welke soorten als eerste het gebied binnenkomen. Verder zal het overstroomde oppervlak en de duur en frequentie van overstroming bepalen waar veel zaden worden afgezet. Ondanks het feit dat zaadverspreiding via de wind een grotere rol speelt in de zomer dan in de winter, lijkt het erop dat ook in de zomer heel veel zaden via het water worden afgezet. Voor herstelprojecten die in het voorjaar worden opgeleverd kan zomeroverstroming de kolonisatie van het beekdal waarschijnlijk versnellen door een toename in de aanvoer van zaden. Zomeroverstroming kan echter ook een belangrijke oorzaak zijn voor sterfte van zaailingen van verschillende oeversorten, iets wat de opvolgende jaren na herstel ongewenst is.

**FIGUUR 9** PATRONEN IN ZAADDEPOSITIE LANGS EEN HOOGTEGRADIËNT IN DE OEVERZONE VAN DE HAGMOLENBEEK MET HET AANTAL SOORTEN ZADEN EN HET TOTAAL AANTAL ZADEN IN RESPECTIEVELIJK DE WINTER- (DECEMBER 2010-APRIL 2011) EN DE ZOMERPERIODE (APRIL 2011-OCTOBER 2011)



In gebieden die in het voorjaar worden opgeleverd, zou een éénmalige voorjaarsoverstroming het proces van kolonisatie door typische beek(dal)soorten in ieder geval kunnen versnellen, om daarna door snelle vestiging van planten erosie tegen te gaan.

FIGUUR 10

FOTO'S VAN EEN VLOEDMERK BIJ DE HOOGHE RAAM MET ZADEN IN FEBRUARI 2012 (LINKS) EN KIEMPLANTEN IN JULI 2012 (RECHTS), MET INDIVIDUEN VAN ZWARTE ELS (*ALNUS GLUTINOSA*), WOLFSPOOT (*LYCOPUS EUROPAEUS*) EN ZWART TANDZAAD (*BIDENS FRONDOSA*)

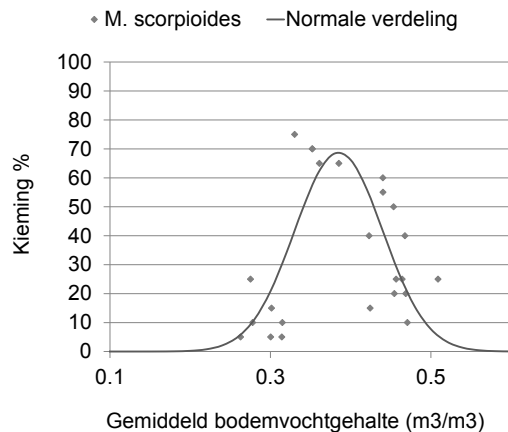


### 3.2.4 KIEMING

Bij afwezigheid van zaden (of plantfragmenten) zal een soort zich nooit kunnen vestigen na beekherstel. Het arriveren van zaden of plantfragmenten hoeft echter ook niet noodzakelijkerwijs te leiden tot vestiging van een soort. Zaden moeten eerst nog kiemen, om vervolgens het zaailingstadium, de meest kwetsbare fase in de levenscyclus van een plant, te doorlopen. Ons kiemingsexperiment met negen veelvoorkomende beekoeversoorten laat zien dat de meeste soorten het beste kiemen in een bepaald gedeelte van de hydrologische gradiënt in het beekdal (Figuur 11). Bijvoorbeeld het kiemingspercentage van zaden van Moerasvergeetmijnietje (*Myosotis scorpioides*) is het hoogst ongeveer in het midden van de gradiënt, bij een bodemvochtgehalte rond  $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Op nattere en drogere plaatsen in de gradiënt neemt het kiempercentage af.

FIGUUR 11

KIEMINGSPERCENTAGE VAN ZADEN VAN MOERASVERGEETMIJNIETJE IN HET KIEMINGSEXPERIMENT LANGS EEN HYDROLOGISCHE GRADIËNT (VAN IN DE BEEK TOT HOOG OP DE OEVER)

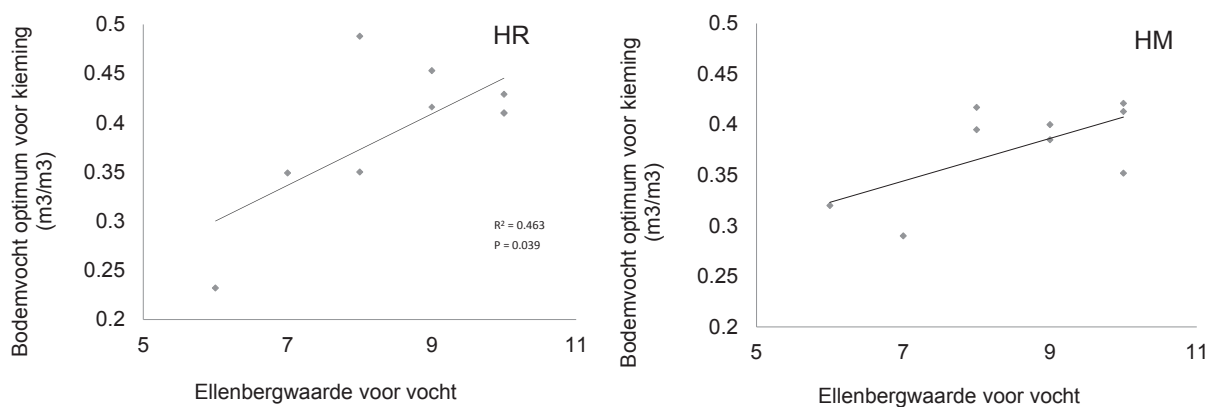


De optimale plek voor zaadkieming van de verschillende soorten varieerde over de gradiënt. Ellenberg-waarde voor vocht (een maat die aangeeft onder welke omstandigheden volwassen planten meestal zijn te vinden) bleek een sterk verklarende factor voor deze spreiding (Figuur 12). Dit geeft aan dat kieming al bijdraagt aan waar een soort als adulte plant voorkomt. Kieming is dus een zeer bepalende stap in de levenscyclus. Voor herstelprojecten betekent dit, dat na zaaddepositie een 'selectie' van soorten plaatsvindt in het stadium van kieming, welke afhankelijk is van de beschikbaarheid van passende milieuomstandigheden. Een brede hydrologische gradiënt biedt daarbij plaats aan veel plantensoorten, die elk hun eigen voor-

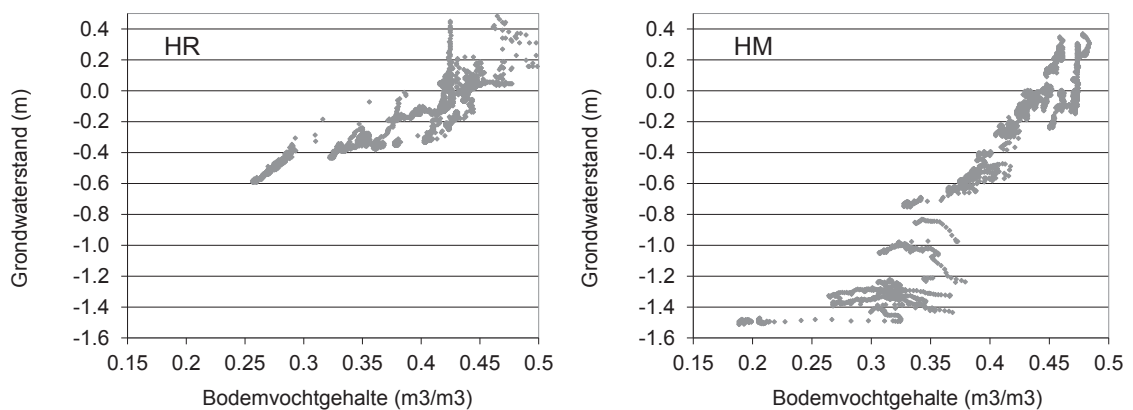
keur hebben: een smallere gradiënt zal tot beperking in soortenrijkdom van oeverplanten leiden (zoals in de meeste niet herstelde, steile oevers ook te zien is), ook al komen zaden wel binnen. Voor zaailingoverleving lijkt hetzelfde te gelden als voor kieming.

Binnen de hydrologische gradiënt is niet de afstand tot de beek, maar juist de gradiënt in het bodemvochtgehalte sturend voor vegetatie. Het bodemvochtgehalte wordt in sterke mate bepaald door de afstand tot het (grond)water, maar eigenschappen van de bodem zoals vochtvasthoudend vermogen en mate van capillaire opstijging spelen ook een belangrijke rol, iets wat aanzienlijk kan verschillen tussen beken. Bij de Hagmolenbeek en de Hooge Raam waren deze verschillen bijvoorbeeld duidelijk zichtbaar, zoals te zien is in de verschillende relaties tussen bodemvochtgehalte en grondwaterstand voor deze beken (Figuur 13).

FIGUUR 12 RELATIE TUSSEN HET OPTIMALE BODEMVOCHTGEHALTE VOOR KIEMING VAN EEN SOORT MET DE ELLENBERG INDICATOR WAARDE VOOR VOCHT VOOR DE BEKEN HOOGHE RAAM (HR) EN HAGMOLENBEEK (HM)



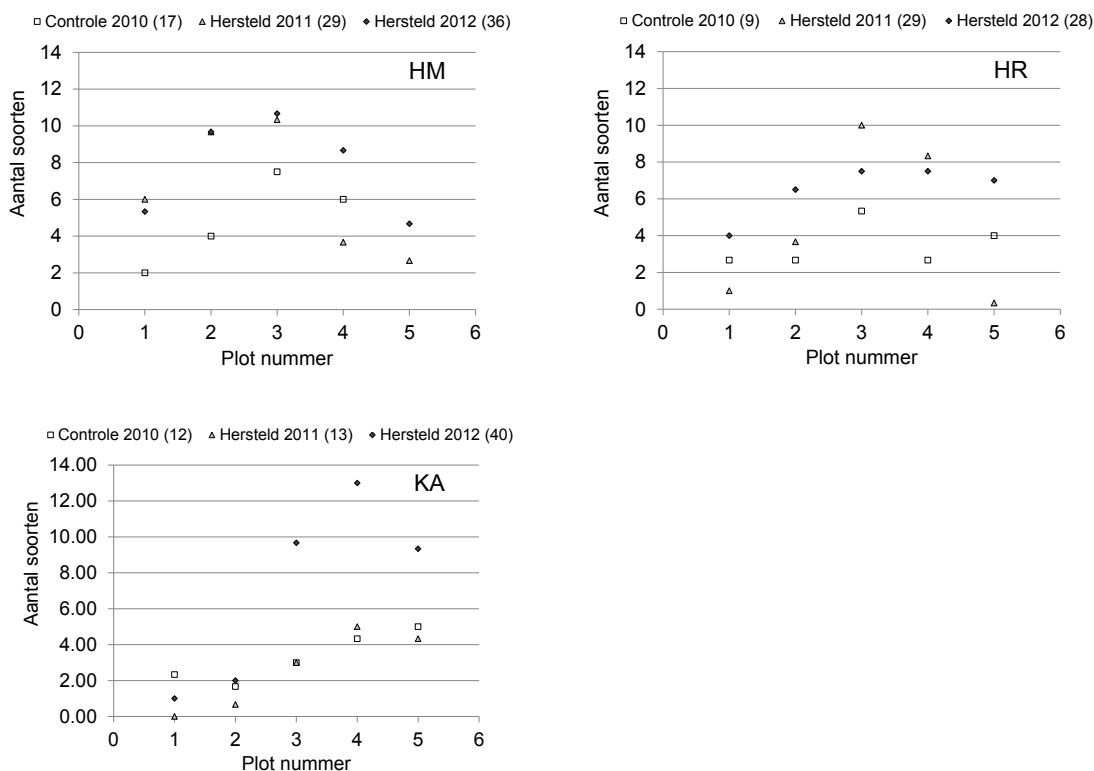
FIGUUR 13 RELATIE TUSSEN BODEMVOCHTGEHALTE ( $M^3/M^3$ ) EN GRONDWATERSTAND VANAF MAAVELDHOOGTE (M) VOOR DE BEKEN HOOGHE RAAM (HR) EN HAGMOLENBEEK (HM) IN DE PERIODE MEI - AUGUSTUS 2011



### 3.2.5 VEGETATIE-ONTWIKKELING

Om het effect van beekherstel op vegetatie-ontwikkeling van oevervegetatie te meten, zijn in 2010 eerst vegetatieopnames gemaakt van onherstelde beektrajecten die later nog hersteld gingen worden (Kleine Aa en Tengelroyse Beek), of van onherstelde trajecten direct bovenstrooms van het beekherstelproject (Hagmolenbeek, Hooge Raam, Luntersche Beek). Vervolgens zijn in 2011 en 2012 vegetatie-opnames gemaakt in de herstelde trajecten van deze beken. Op dit moment kunnen alleen de resultaten van drie beken worden gepresenteerd. Uit deze opnames is gebleken dat in herstelde trajecten meer soorten voorkomen dan in onherstelde trajecten, ‘controletrajecten’ genoemd (Figuur 14). Dit geldt voor zowel de totale soortenaantallen in vegetatie-opnames uit een gebied (Figuur 14) als voor het aantal soorten in een plot.

**FIGUUR 14** GEMIDDELD AANTAL PLANTENSOORTEN IN DRIE VEGETATIE-OPNAMES PER PLOT NUMMER, VAN DICHTBIJ DE BEEK (PLOT NUMMERS 1) TOT HOOG OP DE OEVER (PLOT NUMMERS 5), IN EEN ONHERSTELD BEEKTRAJECT IN 2010 (CONTROLE), EN IN HERSTELDE TRAJECTEN IN 2011 EN 2012 BIJ DE HAGMOLENBEEK (HM), HOOGHE RAAM (HR) EN DE KLEINE AA (KA), MET IN DE LEGENDA PER PERIODE HET TOTAAL AANTAL SOORTEN IN DE VEGETATIE OPNAMES TUSSEN HAAKJES WEERGEGEVEN



Het hogere soortenaantal was in 2011 al zichtbaar bij de beken die het eerst zijn hersteld, namelijk de Hagmolenbeek en de Hooge Raam. Voor de Kleine Aa was dit verschil zichtbaar in 2012, een jaar na de herstelwerkzaamheden. Deze resultaten laten zien dat beekherstel al na een jaar voor een toename in het aantal plantensoorten kan zorgen. Uit verdere analyse van de resultaten is gebleken dat in de herstelde trajecten een duidelijkere verdeling is ontstaan van soorten langs de hydrologische gradiënt in de periode van 2011 naar 2012: van voornamelijk soorten uit natte milieus bij de plots dichtbij de beek naar soorten uit drogere milieus hoger op de oever. Dit laat zien dat de vegetatiepatronen een jaar na herstel (tot twee jaar na herstel voor de Hagmolenbeek) nog sterk in ontwikkeling zijn. Deze ontwikkelingen zouden in de tijd (naar latere successiestadia) moeten worden gevolgd om het beekherstel nog beter te

kunnen beoordelen. De hogere soortenaantallen zullen door de gradiënten in omgevingscondities naar verwachting blijven bestaan of nog hoger worden. De hogere plantendiversiteit en de meer typische beek(dal)soorten zorgen op hun beurt weer voor habitat voor macrofauna. Daarmee kan de algehele biodiversiteit van het systeem worden vergroot.

**TABEL 6** AANWEZIGE PLANTENSOORTEN IN ZAADVALLLEN (PERIODE DECEMBER 2010 – APRIL 2011, EN PERIODE APRIL 2011 – OKTOBER 2011)  
EN IN VEGETATIE OPNAMEN IN 2011 EN 2012 BIJ DE HAGMOLENBEEK

	Soort	# zaden dec 2010 - april 2011	# zaden apr 2011 - okt 2011	Vegetatie 2011	Vegetatie 2012
1	Juncus sp.	82638	904095	aanwezig	aanwezig
2	Rorippa palustris	6861	9419	aanwezig	aanwezig
3	Gnaphalium uliginosum	853	7584	aanwezig	aanwezig
4	Betula sp.	464	593	aanwezig	
5	Chenopodium sp.	389	189		aanwezig
6	Hypericum sp.	128			
7	Echinochloa crus-galli	51	73	aanwezig	
8	Alnus glutinosa	22	1		aanwezig
9	Lycopus europaeus	20	0	aanwezig	aanwezig
10	Alnus sp.	12			
11	Alnus incana	9			
12	Poacea sp.	7		aanwezig	
13	Sparganium erectum	4			
14	Persicaria lapathifolia	2	332		aanwezig
15	Potamogeton pectinatus	2			
16	Spergula arvensis	2			
17	Rumex obtusifolius	1	94		
18	Alium schoenoprasum	1			
19	Angelica sylvestris	1			
20	Scirpus sylvaticus	1			
21	Trifolium repens		436	aanwezig	aanwezig
22	Phleum pratense ssp. pratense		274	aanwezig	aanwezig
23	Alisma plantago-aquatica		236		aanwezig
24	Veronica catenata		232		
25	Lolium perenne		186	aanwezig	aanwezig
26	Agrostis capillaris/canina		178		
27	Ranunculus sceleratus		148		aanwezig
28	Myosotis scorpioides		50	aanwezig	aanwezig
	Onbekend 5: Arabidopsis		41		
29	thaliana				
30	Ranunculus repens		26	aanwezig	aanwezig
31	Onbekend 3		14		
32	Persicaria minor		12		
33	Isolepis setacea		10		
34	Ranunculus flammula		10	aanwezig	aanwezig
35	Taraxacum officinale F.H. Wigg		10		aanwezig
36	Glyceria fluitans		8		
37	Stellaria media		7		aanwezig
38	Bidens frondosa		6		
39	Conyza sumatrensis		3		
40	Ranunculus peltatus		3		
41	Veronica sp.		2		
42	Onbekend 1		2		
43	Onbekend 2		1		
44	Onbekend 4		1		
45	Hieracium sp.		1		
46	Persicaria mitis		1		
47	Plantago major ssp. Major		1	aanwezig	aanwezig
48	Ranunculus sp.			aanwezig	
49	Sparganium emersum				aanwezig
50	Poa trivialis				aanwezig
51	Persicaria maculosa				aanwezig
52	Matricaria recutita				aanwezig
53	Lythrum salicaria				aanwezig
54	Festuca pratensis				aanwezig
55	Bidens frondosa				aanwezig
56	Eleoidea sp.				aanwezig
57	Cirsium arvense				aanwezig
58	Callitriche sp.				aanwezig
59	Asteracea sp.			aanwezig	aanwezig
60	Epilobium sp.			aanwezig	
61	Galium palustre			aanwezig	
62	Matricaria chamomilla			aanwezig	
63	Phalaris arundinacea			aanwezig	aanwezig



### 3.3 BEEKMACROFAUNA

#### 3.3.1 INTRODUCTIE

Beekherstel wordt in Nederland op grote schaal toegepast. Waar beken in het verleden zijn gekanaliseerd, wordt nu getracht het natuurlijke karakter terug te krijgen. Optimaal herstel van beken is het beste mogelijk wanneer consequenties van de betreffende maatregelen bekend zijn. Ondanks het grote aantal projecten dat is uitgevoerd in Nederland de laatste decennia, is niet of nauwelijks gekwantificeerd wat de effecten van de maatregelen op het beekstelsysteem zijn. Bovendien blijkt uit projecten waar onderzoek is verricht naar ecologische kwaliteitsverbetering dat systemen naar verwachting niet zijn verbeterd (Verdonschot & Didderen, 2009).

Een waarschijnlijke oorzaak voor het beperkte succes van beekherstelprojecten uit het verleden, is dat men in het verleden bij het herstel slechts uitging van verbetering van de beekmorfologie, terwijl stroming en het belang van de beekbodem onderbelicht bleven. Ecologische kwaliteitsverbetering wordt afgeleid van de macrofaunagemeenschap, waarbij soortabundantie geldt als biologische indicator voor de kwaliteit van aquatische ecosystemen. Het grootste deel van de macrofaunagemeenschappen heeft echter een benthische levenswijze, wat inhoudt dat het substraat en de structuren op de beekbodem samen met de stromingscondities het leefmilieu bepalen. Deze factoren samen vallen onder de noemer hydromorfologie en zijn bepalend voor de soortengemeenschap van de beek.

Sterk gedegradeerde beken kenmerken zich door het ontbreken van stromingsminnende of rheofiele soorten. De oorzaak hiervan is dat door kanalisatie de natuurlijke hydromorfologie is verdwenen. Ten eerste fungeren gekanaliseerde beken over het algemeen als efficiënte drainagesystemen, waarbij het afvoerregime geregeerd wordt door het klimaat. Tijdens droge perioden wordt het water vast gehouden door de stuwen te sluiten om zodoende droogval te voorkomen, terwijl flinke regenval een directe piekafvoer tot gevolg heeft. Voor aquatische macrofauna heeft dit desastreuze gevolgen, aangezien er onregelmatig lange perioden van stagnatie worden afgewisseld met enorme stroomsnelheden tijdens piekafvoeren. Stagnatie is beperkend voor rheofiele soorten door zuurstoflimitatie en verslibbing van de bodem. Stroomsnelheden die worden bereikt tijdens piekafvoeren, zorgen ervoor dat ook substraten en structuren wegspoelen, waardoor de beekbodem erg homogeen wordt. Dergelijke stroomsnelheden zijn een risico voor het verdwijnen van de benthische macrofauna omdat het drift kan veroorzaken. Kolonisatie en overleving van gevoelige rheofiele soorten is onmogelijk onder extreme homogene habitatcondities.

De belangrijkste hypothese van dit onderzoek is dat het aanbrengen van habitatheterogeniteit en het dempen van de afvoerdynamiek in deze systemen zal leiden tot ecologische verbetering. Door aanpassing van het beekecosysteem is er meer geschikte habitat voor doelsoorten en komen nieuwe niches vrij, waardoor de reeds aanwezige rheofiele soorten in het gedegradeerde ecosysteem in aantal zullen toenemen, terwijl ook nieuwe soorten zich zullen vestigen.

Het doel van dit onderzoek is om hydromorfologische randvoorwaarden voor beekspecifieke macrofauna soorten te kwantificeren. Om de vraag of het creëren van de ideale omstandigheden in een beek zinvol is voor ecologische verbetering te kunnen beantwoorden, moet er meer inzicht zijn in proces waarin beekorganismen in staat zijn een nieuw habitat te bereiken en moeten consequenties van herstelmaatregelen worden gekwantificeerd.



In dit project zijn op grote schaal consequenties van hydromorfologische veranderingen voor macrofauna gekwantificeerd. Zes beken zijn hermeanderd vanuit een beekdalbrede visie, dus met oog voor een integraal herstel over het hele beekdal, iets wat bij de meest beekherstelprojecten uit het verleden (Verdonschot & Didderen, 2009) succesvol is gebleken. Gekanaliseerde en overgedimensioneerde beken zijn voor een groot deel voorzien van een nieuw en verkleind meanderend profiel en de stuwen waarmee de beek voorheen werden gereguleerd zijn verwijderd of volledig opgezet. De nieuwe condities zouden een toename van habitatheterogeniteit en ecologische kwaliteit tot gevolg moeten hebben, doordat de stromingsvariatie en de gemiddelde stroomsnelheid is toegenomen.

De hydromorfologische consequenties zijn niet alleen gekwantificeerd in deze zes hermeanderingsprojecten, maar ook in vijf beken waar dood hout is ingebracht. Dood hout is een natuurlijke structuur en habitat voor doelsoorten in laaglandbeken. De houtpakketten zijn in de beek geplaatst om stromingsvariatie te verhogen en habitatheterogeniteit te creëren, o.a. door bladval en het ontstaan van grindbedden. Ook is op deze manier de beek een meer natuurlijk karakter te geven en condities te scheppen waarbij doelsoorten toenemen in aantal of zich opnieuw vestigen.

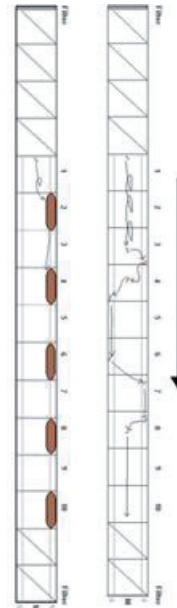
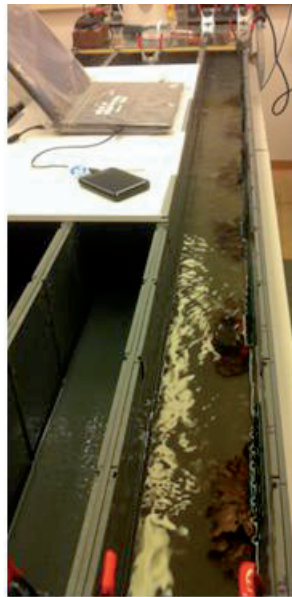
### 3.3.2 KUNSTBEEKEXPERIMENTEN

Met behulp van laboratoriumexperimenten is op kleine schaal van ruimte en tijd onderzocht hoe kokerjuffers zich vanuit een al geïnitieerde drift kunnen redden onder verschillende stromingscondities, of ze dat proces actief kunnen beïnvloeden en wat de rol daarbij is van refugia. Deze informatie geeft inzicht in de impact van piekafvoeren en habitatheterogeniteit op gedrag en mobiliteit van kokerjuffers. Met de resultaten kan worden bepaald in hoeverre deze organismen in staat zijn om wegspoelen door drift te voorkomen in een spectrum van lage tot extreem hoge stroomsnelheden en wat de rol van habitatheterogeniteit hierbij is.

In een kunstbeek is onder laboratoriumomstandigheden onderzocht welke hydromorfologische eisen de macrofauna stelt aan het ecosysteem om nieuwe habitats te kunnen bereiken na driftinitiatie. Er is gebruik gemaakt van kokerjuffers, een zeer indicatieve insectenorde voor stromingscondities in beken, met specialistische soorten die uitsluitend in stromende beeksystemen voorkomen (KRW-doelsoorten), en ook generalistische soorten die zowel stromende als stagnante condities verdragen. Het (strategisch) gedrag, de positionering op de bodem en de driftafstand van drie specialistische en drie generalistische soorten is onder gecontroleerde omstandigheden door continue observaties bestudeerd (The Observer NOLDUS 10.5) (Figuur 15a). De morfologische kenmerken van de individuen en hun kokers zijn na ieder experiment gekwantificeerd. De geteste individuen zijn in drift gebracht en blootgesteld aan één constante stroomsnelheid tijdens een run. Het experiment is uitgevoerd bij stroomsnelheden van 0,1 m/s tot 0,5 m/s op een homogene zandbodem (controle, Figuur 15d), op een zandbodem met blad pakketten (natuurlijk refugia, Figuur 15c, 15e) en op een zand bodem met pakketjes van kunstblad (kunstmatig refugia, Figuur 15b, 15d).

FIGUUR 15

HET KUNSTBEKEN LAB VAN ALTERRA (A), *MICROPTERNA SEQUAX* OP EEN PAKKETJE VAN KUNSTMATIG BLAD (B), EEN STROOMGOOT MET BLADPAKKETTEN (C), EEN SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE SET UP VAN HET EXPERIMENT MET EEN HOMOGENE BODEM (D) EN MET BLADPAKKETTEN AAN DE ZIJKANT (E)

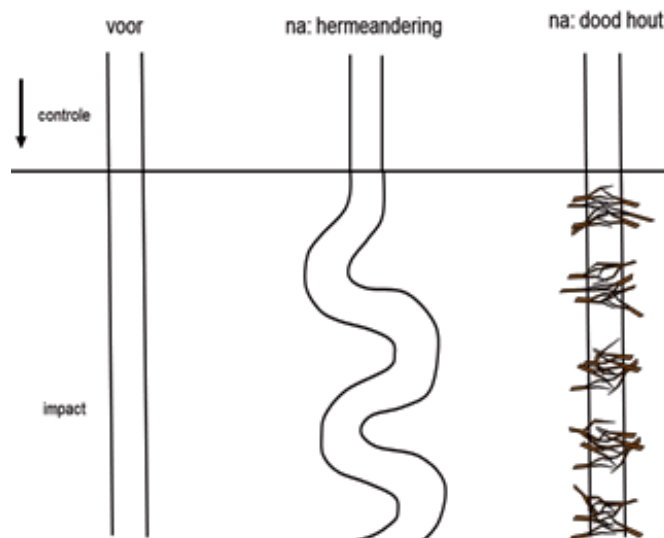


### 3.3.3 BEEKMACROFAUNAMONITORING

In grote trajecten van de Hagmolenbeek, de Hooge Raam, de Kleine Aa, de Lunterse Beek en de Tengelroyse Beek is in 2010 een nieuw meanderend profiel (Figuur 16) aangebracht. Het nieuwe profiel heeft een smal zomerbed voor de retentie van water in droge perioden en een uitgestrekt winterbed dat kan inunderen tijdens piekafvoeren. De maatregel is toegepast om de kwaliteit van het ecosysteem te verbeteren door de gemiddelde stroomsnelheid te verhogen, meer stromingsvariatie en dus habitatheterogeniteit te creëren en de afvoerdynamiek te verminderen.

FIGUUR 16

LENGTEPROFIELSCHETS VAN HERMEANDERING EN INBRENGEN VAN DOOD HOUT (LINKS) EN MULTIPLATE EN SURBERSAMPLER-BEMONSTERING VAN MACROFAUNA (FOTO'S RECHTS)



De inbreng van 'houtpakketten' (Figuur 16) in de Hierdense beek, de Tongelreep, de Tungalroyse beek, de Lunterse beek en de St Anthonisloop had eveneens tot doel de beek kwaliteit te verbeteren. Houtstructuren zijn over de volle breedte van de beek in gebracht in een 'net'-structuur, zodat het water bij lage afvoer door de 'houtpakketten' stroomt en er bij piek afvoer overheen stroomt zodat opstuwing geen probleem veroorzaakt (protocol paragraaf 2.3).

De verbetering van de kwaliteit van het ecosysteem is gekwantificeerd met behulp van macrofaunabemonsteringen (Figuur 16). Bij de analyse is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een BACI-methode (paragraaf 2.4). Stroomsnelheidsmetingen, substraatbepalingen en macrofaunabemonsteringen zijn vier maal gedaan, met tussenpozen van één maand, voor uitvoering van de maatregel om de situatie vooraf vast te leggen. Eén jaar na uitvoering van de maatregel is drie maal bemonsterd om de veranderingen te kunnen kwantificeren en er wordt nog eenmaal een monitoringreeks uitgevoerd in het tweede jaar na de maatregel. De monitoring is uitgevoerd in twee representatieve 20 m transecten van dezelfde beek. In één transect is een herstelmaatregel uitgevoerd (impact) en het andere transect, dat bovenstrooms van het impacttransect is gesitueerd, fungeert als controlesituatie. In Tabel 7 is per beekherstelproject weergegeven wanneer de projecten zijn uitgevoerd en wanneer de monitoring heeft plaats gevonden.

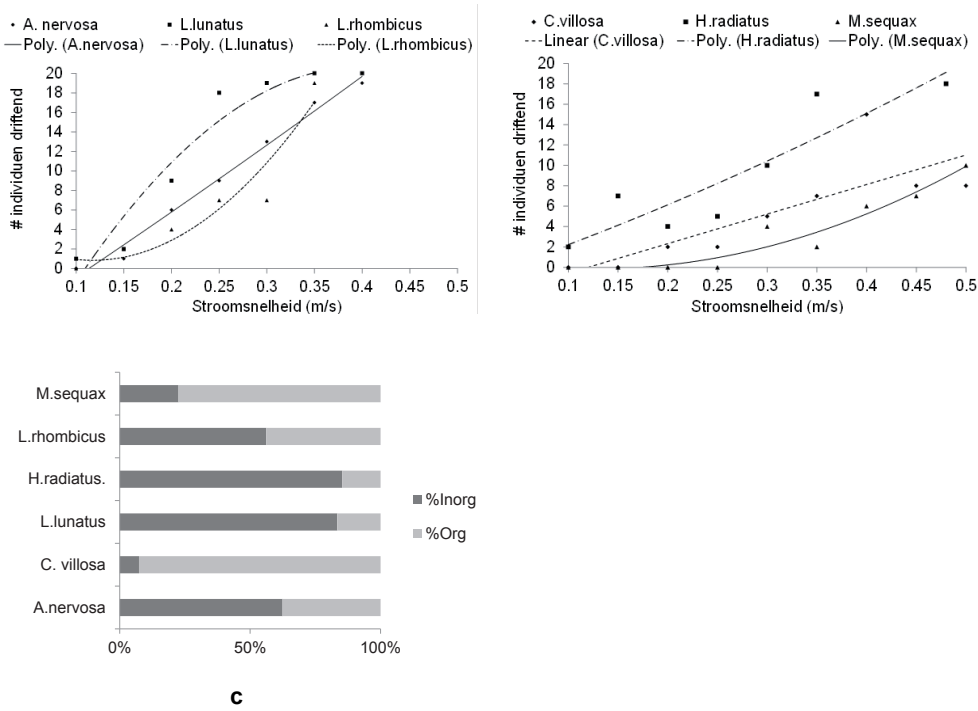
De macrofaunamonsters zijn genomen met een grote Surber-sampler (25x25 cm met 1 mm maaswijdte). Houtpakketten zijn bemonsterd door met kunstmatig substraat (Figuur 16) en door directe verstoring van het hout. In beide gevallen is het oppervlak even groot gehouden als dat van de Surber-sampler. Per dominant substraat zijn vijf subsamples genomen, verspreid over het 20 m onderzoekstraject, die bij elkaar zijn gevoegd tot één representatief monster voor het substraattype. De monsters zijn gedetermineerd tot soortniveau. Boven het bemonsterde pakket is de stroomsnelheid op 40% van de diepte bepaald met een electromagnetische stroomsnelheidsmeter, omdat op deze positie de stroomsnelheid het meest representatief is boven een punt in de waterkolom (Gordon et al., 1992, SENS RS-2). Op basis van deze metingen en extra metingen boven de substraten die minder dominant zijn is de stromingsvariatie van de transecten bepaald.

### 3.3.5 KOKERJUFFERGEDRAG IN EXPERIMENTEN

#### DREMPELWAARDEN VOOR STROOMSNELHEID

Verhoging van de stroomsnelheid verhoogt de kans dat kokerjuffers vanuit de waterkolom niet in staat zijn om zich snel aan de bodem vast te hechten. Als vestigen op een nieuwe plaats niet meer mogelijk is, zullen individuen uitspoelen en zal er depletie van de soort optreden. Figuur 17a en 17b laten zien dat de onderzochte soorten niet allemaal even goed in staat zijn om met hoge stroomsnelheden vast te hechten aan een kale zand bodem.

FIGUUR 17 HET PERCENTAGE GENERALISTISCHE SOORTEN (A) EN RHEOFIELE SOORTEN (B) DAT NIET UIT EEN GEÏNITIEERDE DRIFT KAN KOMEN BIJ VERSCHILLENDE STROOMSNELHEDEN EN DE SAMENSTELLING (ORGANISCH/ANORGANISCH) VAN DE KOKERS VAN DE ONDERZOCHE SOORTEN (C)



[illegible]

TABEL 8

CLASSIFICATIE VAN STROOMSNELHEDEN WAARBIJ DE ZES ONDERZOCHE KOKERJUFFERSOORTEN GEEN PROBLEMEN HEBBEN, ER EEN REDELIJKE KANS IS OP DRIFT EN DE DREMPELWAARDE VOOR STROOMSNELHEID WORDT Overschreden

		Geen problemen	Kans op drift	Drempelwaarde
		>25% drift (m/s)	25 – 75% drift (m/s)	<75% drift (m/s)
generalisten	L. lunatus	0 – 0.15	0.15 – 0.25	<0.25
	A. nervosa	0 – 0.15	0.15 – 0.35	<0.35
	L. rhombicus	0 – 0.2	0.2 – 0.35	<0.35
specialisten	H. radiatus	0 – 0.25	0.25 – 0.35	<0.35
	C. villosa	0 – 0.40	0.40 – nnb	nnb (0.5m/s 35% drift)
	M. sequax	0 – 0.40	0.40 – nnb	nnb (0.5m/s 45% drift)

Zowel soortspecifieke eigenschappen als de het materiaal van de koker spelen een rol bij het vermogen om te kunnen gaan met hoge stroomsnelheden. Over het algemeen ligt voor generalisten (Figuur 17a), soorten die zowel in stagnant als stromend water kunnen voorkomen, de drempelwaarde voor stroomsnelheid een stuk lager dan voor echte rheofiele soorten (Figuur 17b). *Limnephilus lunatus*, waarvan het kokertje voornamelijk uit organisch materiaal bestaat (Figuur 17c), is duidelijk zwakker dan de andere twee generalisten. Anderzijds is *Halesus radiatus* de enige rheofiele soort die bij een stroomsnelheid van 0,25 m/s problemen krijgt. Ondanks dat de koker *H. radiatus* voor een groter deel uit organisch materiaal bestaat, zijn de drempelwaarden niet lager dan die van de generalistische soorten. Bij stroomsnelheden vanaf 0,35 m/s spoelt meer dan 75% van deze soort én van de drie generalisten weg (Tabel 8). Van de twee andere stromingsminnende soorten die zijn onderzocht (*Chaetopteryx villosa* en *Micropterna sequax*), was minder dan 25% weggespoeld bij deze stroomsnelheid en minder dan 50% bij 0,5 m/s. *Limnephilus lunatus*, één van de meest algemene kokerjuffersoorten van Nederland, is het minst tolerant voor hoge stroomsnelheden.

#### ACTIEF REDUCEREN DRIFT AFSTAND

Tabel 9 geeft weer dat alle onderzochte kokerjuffersoorten, behalve *L. Lunatus*, de drift afstand verkleinen door actief gedrag bij lage stroomsnelheden. Naarmate het harder gaat stromen is het omgekeerde het geval, dan wordt het juist moeilijker voor de kokerjuffers om hun drift afstand te reduceren.

TABEL 9

HET VERSCHIL IN DRIFT AFSTAND TUSSEN DODE EN LEVENDE KOKERJUFFERS BIJ DRIE STROOMSNELHEDEN  
(N=20 PER SOORT EN STROOMSNELHEIDSCATEGORIE, \* P<0.05, \*\*P<0.01 EN P<0.001)

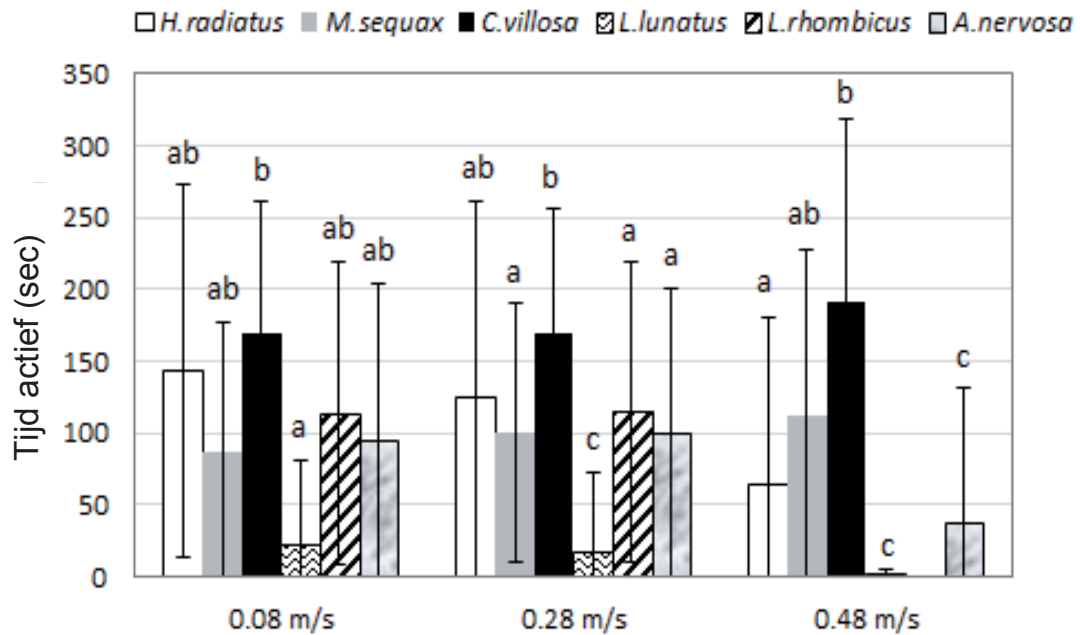
Flow (m/s)	A.nervosa	L.lunatus	L.rhombicus	C.villosa	M.sequax	H.radiatus
0.08	U=40 +0.000***	U=161 = 0.236	U=85 + 0.001**	U=85 + 0.000***	U=106 + 0.001**	U=80.5 +0.001**
0.28	U=107 + 0.010*	U=160 -0.038*	U=189 - 0.758	U=187 + 0.001**	U=98 + 0.002**	U=128 - 0.030*
0.48	U=152 - 0.050	U=200 = 1.000	-	U=40 - 0.000***	U=57 - 0.000***	U=140 - 0.009**

#### TIJD ACTIEF TIJDENS EXPERIMENT:

Generalisten vertonen geen actief gedrag meer wanneer de drempelwaarde is overschreden (Figuur 18). De stromingsminnende soort *H. radiatus* vertoont ondanks de overschreden drempelwaarde nog steeds actief gedrag in een poging zich te redden. Voor *C. villosa* en *M. sequax* wordt de drempelwaarde nog niet overschreden bij 0,5 m/s, deze soorten ondervinden weinig hinder van de stroomsnelheid en vertonen even veel actief gedrag bij hoge als bij lage stroomsnelheden. *L. Lunatus* is niet erg actief bij alle stroomsnelheden.

FIGUUR 18

GEMIDDELDE TIJD WAARIN DE KOKERJUFFERS ACTIEF GEDRAG VERTOONDEN TIJDENS DE EXPERIMENTEN (N=20 PER SOORT EN STROOMSNELHEIDSCATEGORIE). DE LETTERS BOVEN DE STAVEN IN HET DIAGRAM DUIDEN OP VERSCHILLEN TUSSEN SOORTEN PER STROOMSNELHEIDSCATEGORIE (MANN-WHITNEY U TEST;  $P < 0.05$ )



### 3.3.6 HERMEANDERING

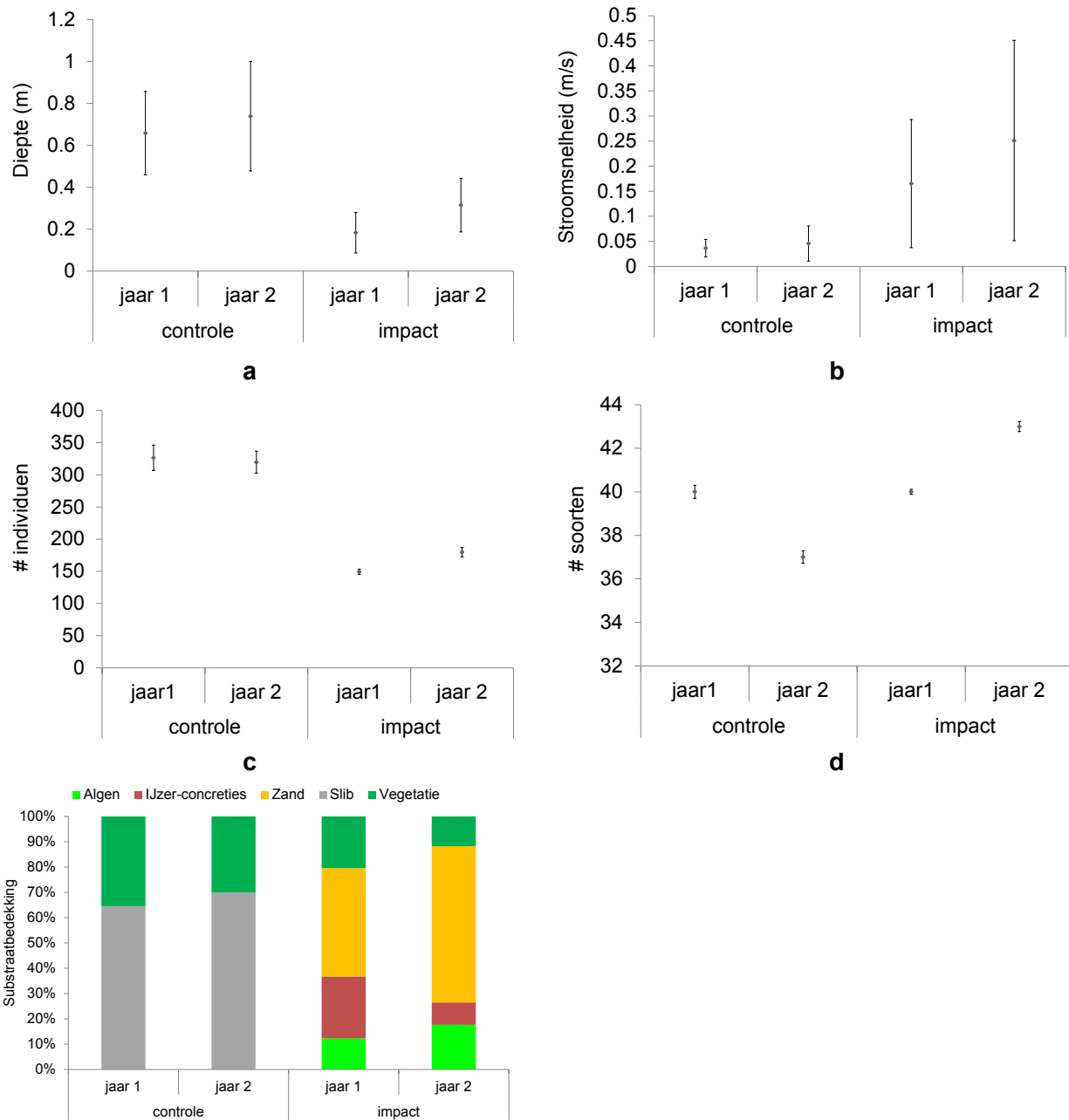
In deze voorlopige resultaten zijn de monitoring data van de situatie vooraf opgenomen evenals de data van drie bemonsteringen erna. In deze paragraaf wordt één hermeanderings- (Hagmolenbeek) en één dood houtproject (Hierdense Beek) belicht.

Het herstelproject in de Hagmolenbeek was reeds uitgevoerd in april 2010 voor aanvang van dit onderzoek. Omdat er geen data zijn van vóór de maatregel, concentreerde het onderzoek zich op de ontwikkeling van het traject in vergelijking tot het bovenstroomse controletraject. Het gekanaliseerde (controle)deel van de Hagmolenbeek, bestaat uit een slibbodem met aan de oevers vegetatie. Het impacttraject heeft een meer gevarieerde bodembedekking (Figuur 19e), met voornamelijk zand, ijzerconcreties aan de oevers, vegetatie verspreid in plukken over de beekbodem en aangroei van draadalg in het midden van de loop. Na de hermeandering heeft de Hagmolenbeek een smal en ondiep zomerbed met draadalg in het midden van de loop. Na de hermeandering heeft de Hagmolenbeek een smal en ondiep zomerbed (Figuur 19a) met een brede inundatiezone. In het verkleinde beekprofiel is de gemiddelde stroomsnelheid tussen de 0,15 en 0,20 m/s in het eerste jaar en rond de 0,25 m/s in het tweede jaar (Figuur 19b). Ten opzichte van het controledeel, waar het minder dan 0,05 m/s stroomde is dat een forse verhoging. De stromingsvariatie is veel hoger in het aangepaste bodemprofiel ( $\pm$ SD-Figuur 19b).



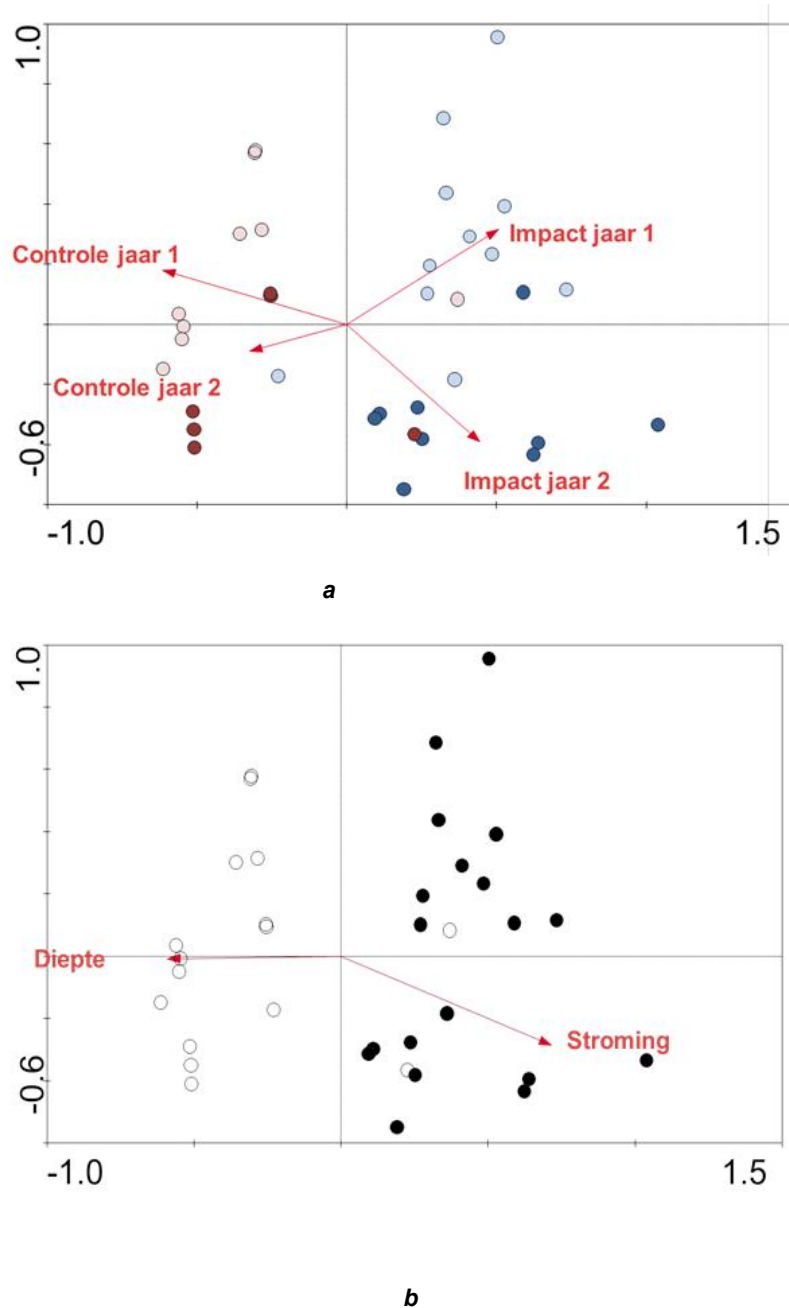
FIGUUR 19

GEMIDDELDE STROOMSNELHEID VAN GEMIDDELDE DIEPTE (A), STROMINGSVARIATIE (B), GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER (C) EN HET GEMIDDELDE AANTAL SOORTEN PER MONSTER (D) IN HET CONTROLE (ROOD) EN HET HERMEANDERDE TRAJECT (BLAUW, IMPACT) VAN DE HAGMOLENBEEK. SUBSTRAAT BEDEKKING IN DE HAGMOLENBEEK (E)



FIGUUR 20

INVLOED VAN DE BEHANDELING OP DE MACROFAUNAMONSTERS (A), MET IN HET ROOD CONTROLEMONSTERS, IN HET BLAUW MONSTERS UIT HET HERMEANDERINGSTRAJECT; LICHTGEKEURD DE MONSTERS UIT JAAR ÉÉN EN DONKER GEKEURD DIE UIT JAAR TWEE. DE VERKLARENDE ABIOTISCHE FACTOREN ZIJN IN GRAFIEK B WEERGEGEVEN MET IN HET ZWART DE MONSTERS UIT HET HERMEANDERINGSTRAJECT EN IN HET WIT DE CONTROLE MONSTERS



In totaal zijn bij de analyse 8516 individuen meegenomen van de groepen Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Crustacea, Mollusca en Oligochaeta. Het gemiddelde aantal individuen per genomen monster was lager in het hermeanderde traject (Figuur 18c). Figuur 18d laat een ontwikkeling zien van het gemiddelde aantal soorten per monster genomen in het hermeanderingstraject: in het eerste jaar was het aantal soorten laag in het hermeanderde traject, maar in het tweede jaar was het net zo hoog als in het controletraject. Macrofaunamonsters uit het controletraject zijn anders van soortensamenstelling dan die uit het traject dat is hermeanderd met verkleind bodemprofiel (Figuur 20a). Ook zijn de monsters uit het eerste jaar na de maatregel anders dan die uit het tweede jaar. Deze temporele variatie is zichtbaar in

zowel het controle als het hermeanderde traject: in beide jaren verschillen deze twee trajecten Hagmolenbeek van elkaar. Het verschil in macrofaunasamenstelling tussen controle en impact wordt verklaard door de verhoogde stroomsnelheid en het verondiepte profiel (Figuur 20b). De verhoging van de stroomsnelheid heeft dus een verandering in de macrofaunagemeenschap teweeg gebracht. Veel soorten komen in vergelijkbare hoeveelheden in beide onderzoekstrajecten voor. Soorten zoals *Gammarus pulex*, *Baetis rhodani*, *Nemoura cinerea* en *Hydropsyche angustipennes* die stroming prefereren, zijn in hogere aantallen aanwezig, terwijl aantallen van de generalistische soorten *Asellus aquaticus* en *Cloeon dipterum*, maar ook indicatoren voor langzaam stromend water zoals *Anisus vortex*, *Physa fontinalis*, *Holocentropus picicornis* en *Cyrtus flavidus*, in het herstelde traject lager in aantallen zijn ten opzichte van de controle (Figuur 21).

### 3.3.7 INBRENGEN DOOD HOUT

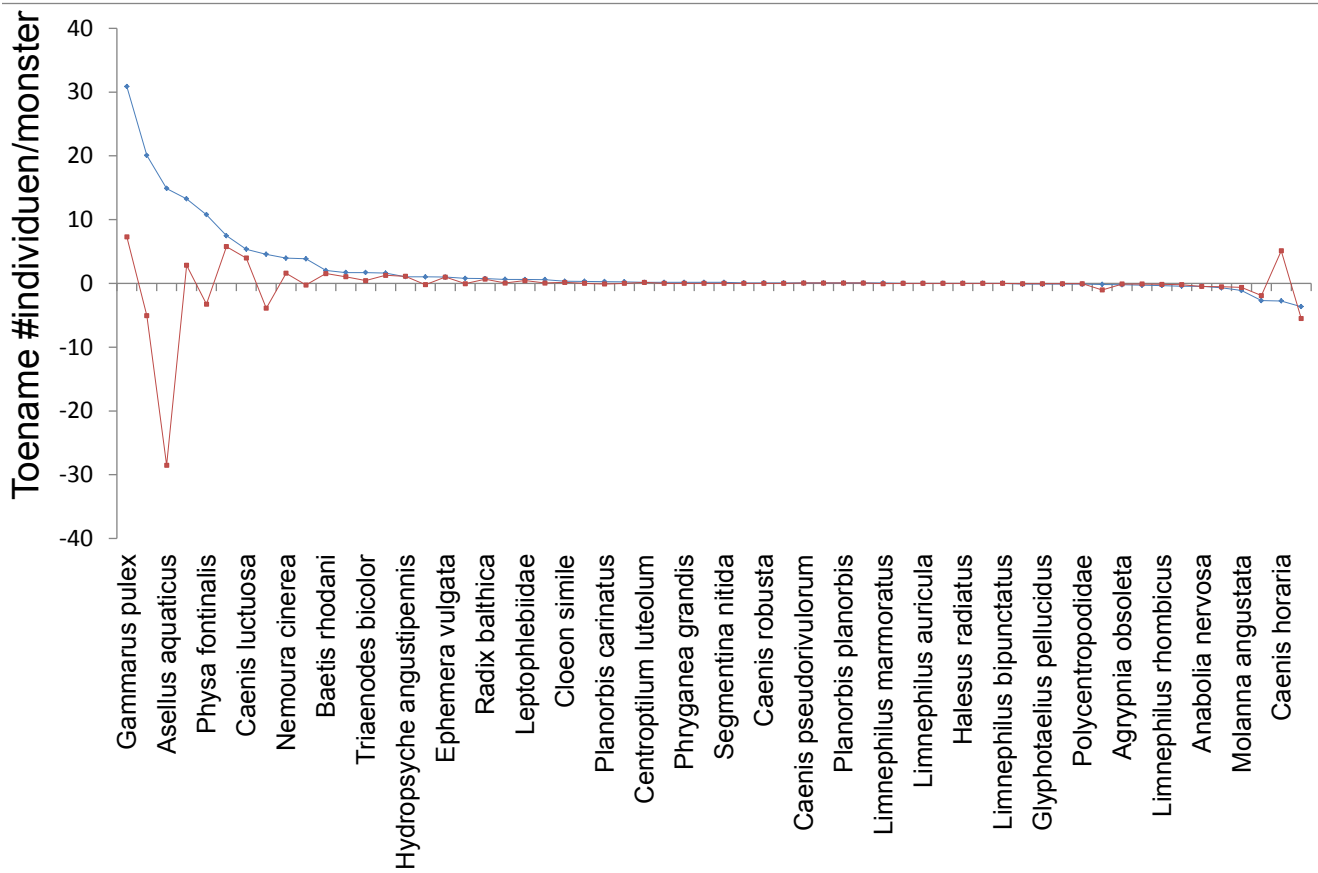
Het inbrengen van dood hout heeft tot gevolg dat er een veel gevarieerder bodemmozaïek van substraten is ontstaan (Figuur 22e). Naast zand en blad zijn nu ook grind, fijn organisch materiaal, grof organisch materiaal en uiteraard houtdominante substraten. De gemiddelde stroomsnelheid en diepte zijn niet veranderd door het dood hout in het onderzoekstraject (Figuur 22a, 22b), maar de stromingsvariatie is sterk toegenomen (Figuur 22a). De verandering van substraat- en stromingscondities tonen de eerste maanden na aanleg nog nauwelijks effect op het aantal individuen of het aantal soorten per monster (Figuur 22d, 22e). Omdat het oppervlak van de verschillende habitats sterk is toegenomen, is er wel een toename in aantallen individuen. Dood hout inbrengen leidt dus niet tot verlies aan soorten of aantallen in de eerste maanden na aanleg. De nog niet verwerkte resultaten van de tweede bemonstering duiden op een duidelijke toename in aantallen individuen.

Er zijn bij de analyse 10483 individuen meegenomen van de groepen Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Crustacea, Mollusca en Oligochaeta. Monsters uit het dood houttraject bevatten na inbreng minder individuen (Figuur 21d) en zijn anders van samenstelling dan de rest van de monsters (Figuur 23a), met als verklarende factor substraat homogeniteit (Figuur 23b). De sterk toegenomen habitat heterogeniteit na inbreng van dood hout, maar ook seizoensvariatie heeft invloed op de soort samenstelling van de monsters gehad.

De monsters genomen in november en december zijn bijvoorbeeld anders dan de monsters genomen in september en oktober (Figuur 23c). In Figuur 24 is van veel soorten, waaronder *Nemoura cinerea*, *Nemoura avicularis* en *Gammarus pulex*, te zien dat de abundantie sterk is afgenomen in het impacttraject na inbreng van het dood hout. Daar tegenover staat een minimale toename van *Halesus radiatus*, *Hydropsyche pellucidula*, *Baetis vernus* en *Lype reducta*, allen soorten die indicatief zijn voor stromend water. De eerst en laatst genoemde van de vier zijn echter ook in het controletraject toegenomen.

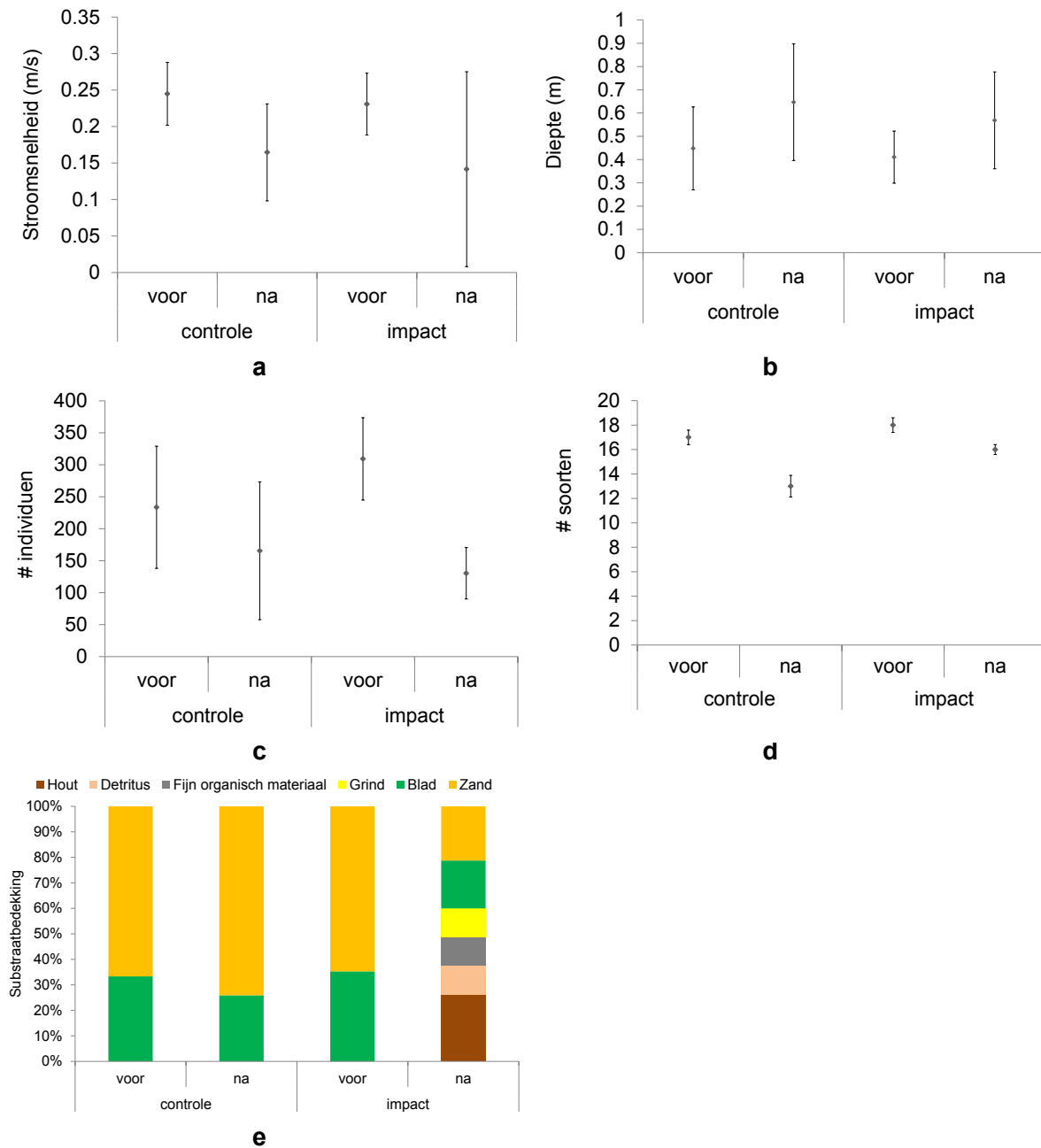
FIGUUR 21

DE VERANDERING VAN DE MACROFAUNASAMENSTELLING IN DE HAGMOLENBEEK WEERGEGEVEN ALS HET VERSCHIL TUSSEN HET GEMIDDELD AANTAL SOORTEN PER MONSTER IN HET CONTROLE- EN HET HERMEANDERDE TRAJECT NA 1 JAAR (ROOD) EN NA 2 JAAR (BLAUW)



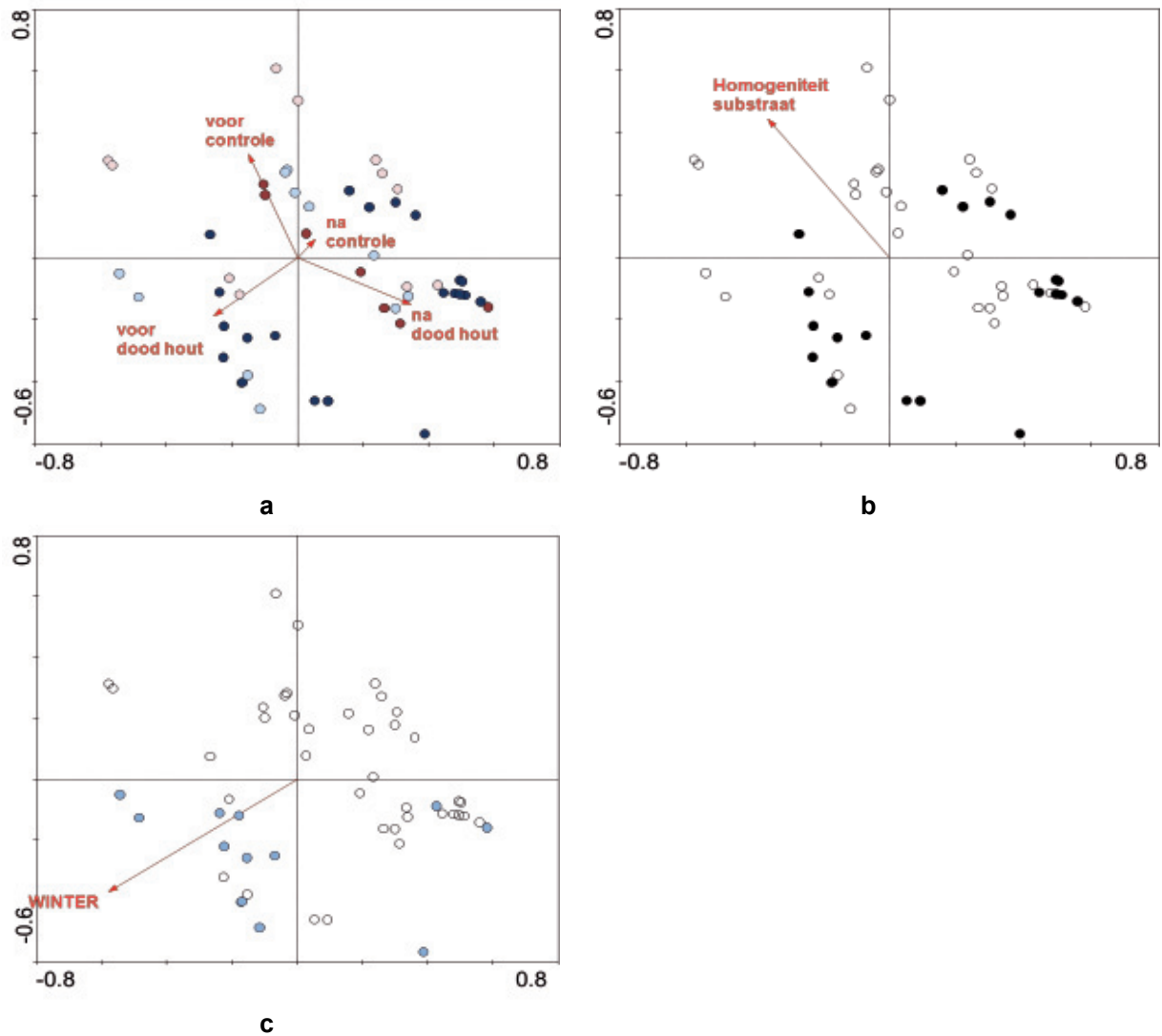
FIGUUR 22

GEMIDDELDE STROOMSNELHEID (A), GEMIDDELDE DIEPTE (B), HET GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER (C) EN HET GEMIDDELD AANTAL SOORTEN PER MONSTER (D) IN HET CONTROLE (ROOD) EN HET HERMEANDERDE TRAJECT (BLAUW, IMPACT) VAN DE HIERDENSE BEEK. GEMIDDELDE SUBSTRAATBEDEKKING IN DE HIERDENSE BEEK (E)



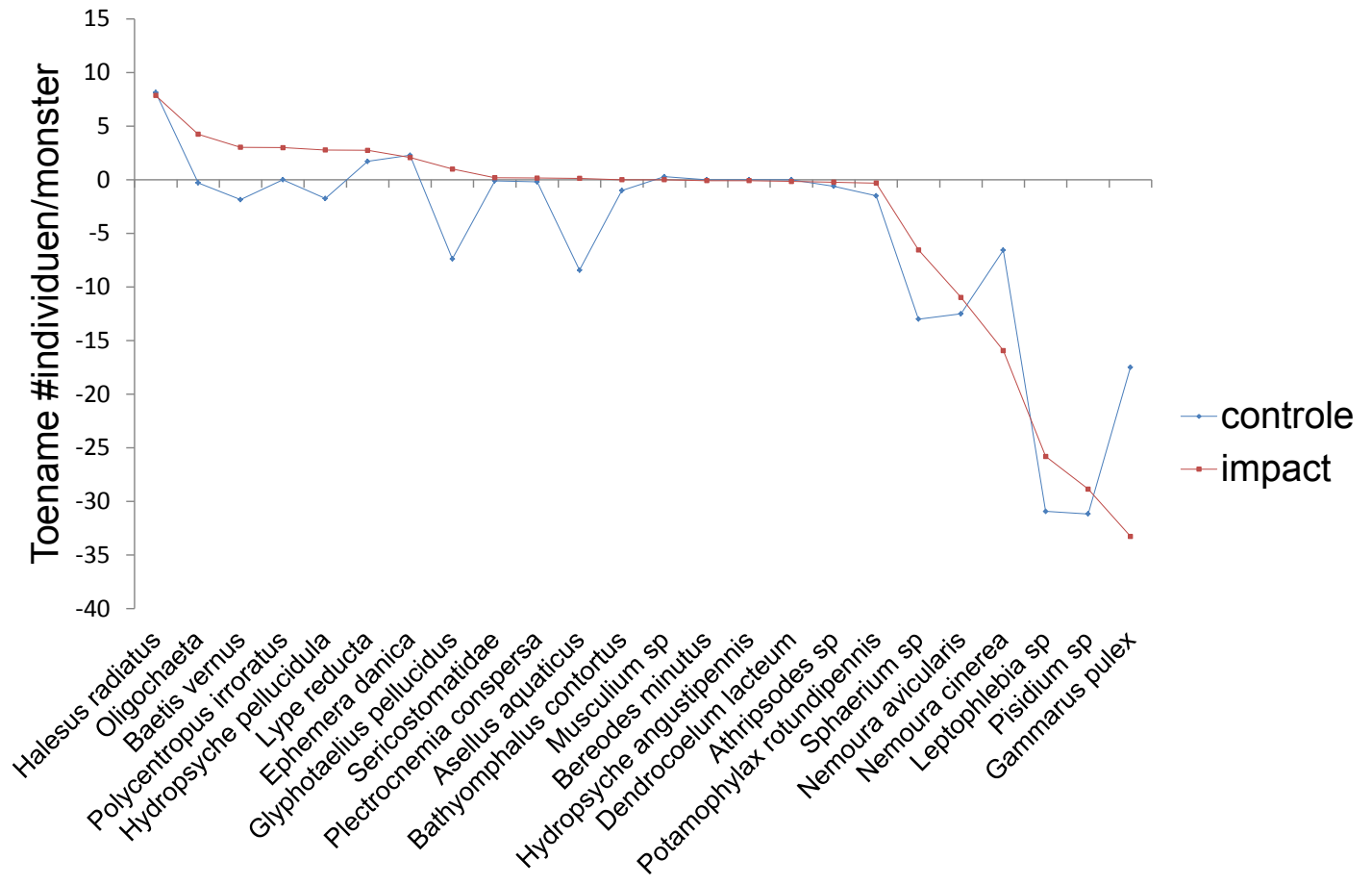
FIGUUR 23

INVLOED VAN HET INBRENGEN VAN DOOD HOUT IN DE HIERDENSE BEEK OP DE MACROFAUNASAMENSTELLING (A) MET CONTROLEMONSTERS (ROOD), MONSTERS UIT HET HERMEANDERINGSTRAJECT (BLAUW), MONSTERS UIT JAAR ÉÉN (LICHTGEKLEURD) EN JAAR TWEE (DONKER GEKLEURD). VERKLARENDE ABIOTISCHE FACTOREN ZIJN SUBSTRAAT HOMOGENITEIT (B) MONSTERS UIT HET HERMEANDERINGSTRAJECT (ZWART) EN CONTROLEMONSTERS (WIT) EN SEIZOENSVARIATIE (C) MET MONSTERS UIT NOVEMBER EN DECEMBER (LICHTBLAUW) EN UIT SEPTEMBER EN OKTOBER (WIT)



FIGUUR 24

DE VERANDERING VAN DE MACROFAUNASAMENSTELLING IN DE HIERDENSE BEEK WEERGEGEVEN ALS HET VERSCHIL TUSSEN HET GEMIDDELDE AANTAL SOORTEN PER MONSTER VOOR- EN NA INBRENG VAN DOOD HOUT IN HET CONTROLETRAJECT (ROOD) EN IN HET TRAJECT WAAR DE DOOD HOUT IS INGEBRACHT (BLAUW)





## 4

## ONDERZOEKSCONCLUSIES

## 4.1 HYDROLOGISCHE EN MORFOLOGISCHE PROCESSEN

Het doel van het hydrologische en morfologische onderzoek was het beoordelen of de innovatieve maatregelen leiden tot een gedempte dynamiek in de afvoer en een grote morfologische variatie. De innovatieve maatregel betrof het toepassen van varianten op het twee-fasenprofiel. Dit betekent dat naast een zomerdoorstroomprofiel ook een verlaagd winterbed is aangelegd. De innovatieve maatregelen toonden relatief weinig effect op de dynamiek van de afvoer, omdat de uitvoering van de maatregelen steeds maar over enkele honderden meters strekte. Er is daarom in meer detail naar de dynamiek van de waterdiepte gekeken, wat een afgeleide van de afvoer is. Bij ieder project is de afvoerduurlijn bepaald. De vorm van de afvoerduurlijn vertelt iets over de dynamiek van de afvoer. De Lunterse Beek heeft de meest dynamische afvoer, gevolgd door de Hagmolenbeek en de Hooge Raam. De Tungelroyse Beek heeft de minst dynamische afvoer.

Bij drie van de vier projecten resulteerde de innovatieve maatregel tot langdurige inundaties, namelijk bij de Hagmolenbeek, de Hooge Raam en bij de Lunterse Beek. Van deze drie projecten heeft de innovatieve maatregel maar bij één project (Lunterse Beek) geleid tot een gedempte dynamiek in de waterdiepte. Er zijn aanwijzingen dat dit verklaard kan worden door het ontwerp. Er is één duidelijk verschil te zien in het ontwerp van deze drie projecten. Bij de Lunterse Beek is een vrijwel *horizontaal winterbed* aangelegd, in tegenstelling tot de Hagmolenbeek en Hooge Raam, waar het winterbed onder een talud is aangelegd. Bij beide projecten treedt dan wel bijna de helft van de tijd inundatie op, maar dit leidt niet tot het afnemen van de dynamiek in de waterdiepte. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat het winterbed van de Lunterse Beek onbegroeid was in de periode waarop de resultaten zijn gebaseerd. Bij de Hagmolenbeek en de Hooge Raam waren de oevers grotendeels begroeid tijdens de meetperiode. Vegetatie op het winterbed kan tot opstuwung leiden en derhalve tot hogere waterstanden en meer dynamiek. Bij de Tungelroyse Beek is de inundatieduur minder dan 2% van de tijd. Bij dit project kan niet worden beoordeeld of het ontwerp van het winterbed tot een gedempte dynamiek van de waterdiepte heeft geleid.

De meeste morfologische veranderingen treden zeer lokaal op. Deze lokale morfologische veranderingen zijn bijvoorbeeld oevererosie (Hagmolenbeek en Lunterse Beek) en sedimentatie van de oude loop (Hagmolenbeek). Alleen in het geval van de Hooge Raam en het benedenstroomse deel van de Lunterse Beek zijn grote morfologische veranderingen opgetreden. Er is geen directe relatie te leggen tussen de dynamiek in de afvoer/waterdiepte en de opgetreden morfologische veranderingen. De Lunterse Beek en Tungelroyse Beek hebben beiden een kleine dynamiek in de waterdiepte. Bij de Tungelroyse Beek heeft dit tot zeer kleine morfologische veranderingen geleid, maar bij de Lunterse Beek juist tot grote morfologische veranderingen. Bij de Lunterse Beek ging het wel om een kortere meetperiode en daarnaast een onbegroeid winterbed. Een langere meetperiode zou moeten leiden tot hardere conclusies met betrekking tot de verschillen in ontwerp en de rol van de vegetatie op de optredende waterstanden en morfologische veranderingen.

#### 4.2 BEEKDALVEGETATIE-ONTWIKKELING

Uit de resultaten van het vegetatie-onderzoek is naar voren gekomen dat de meeste nieuwe soorten en *zaden via overstroming* met beekwater het herstelde gebied binnenkomen. Overstroming kan op deze manier de kolonisatie van het beekdal versnellen, waarbij de frequentie en duur van de overstroming vooral bepaalt waar de meeste zaden terecht zullen komen. Een *brede hydrologische dwarsgradiënt* van natte condities dichtbij de beek tot droge condities hoog op de oever, zorgt er vervolgens voor dat er veel ruimte is voor de optimale kieming- en vestigingscondities voor een verscheidenheid aan plantensoorten. Op deze manier zorgt een brede hydrologische gradiënt voor een biodiverse vegetatie. Ten opzichte van niet herstelde beektrajecten is na 1 á 2 jaar al een toename in het aantal soorten te zien. Deze gebieden zijn echter nog sterk in ontwikkeling, waarbij langzaam maar zeker een natuurlijke spreiding van plantensoorten langs de hydrologische gradiënt optreedt.

#### 4.3 BEEKMACROFAUNA-ONTWIKKELING

Zowel met het driftexperiment in het laboratorium als met de veldmonitoring is aangetoond dat *stromingscondities* belangrijk zijn voor macrofauna. De capaciteit om vanuit drift vast te kunnen hechten aan de bodem is soortspecifiek. Zoals verwacht kunnen rheofiele soorten veel hogere stroomsnelheden aan, ze blijven dan ook langer actief. Bij stroomsnelheden boven de drempelwaarde winnen deze soorten de concurrentie van generalisten, die dan alleen bezig kunnen zijn om drift te voorkomen.

In het veld is waargenomen dat *hermeandering met verkleind profiel de stromingscondities en habitatheterogeniteit sterk hebben verbeterd*. Ten eerste is de gemiddelde stroomsnelheid hoger, ten tweede is de ruimtelijke variatie veel groter geworden en ten derde zijn er meer verschillende habitats. Binnen de twee jaar na de hermeandering zijn *meer rheofiele soorten* en minder indicatoren voor stilstaand water aanwezig in het traject met de aangepaste profielen dan in trajecten waar de beek nog steeds is gekanaliseerd. In lijn met de resultaten van het driftexperiment verliezen de indicatoren voor stilstaand en langzaam stromend water soorten hier de concurrentie van soorten die beter aangepast zijn aan stromend water.

Het inbrengen van dood hout is een zeer effectieve methode gebleken om plaatselijk de habitatheterogeniteit en stromingsvariatie in de beek te verhogen. Eén jaar na houtinbreng begint duidelijk te worden dat de veranderde habitatcondities gevolgen hebben gehad voor de macrofaunagemeenschap. In tegenstelling tot hermeanderen, leidt inbrengen van dood hout niet tot een afname van het totaal aantal soorten en individuen. Inbrengen van dood hout biedt daarmee veel perspectief om met behoud van bestaande waarden de beek te verbeteren. Na ruim een jaar blijkt (resultaten hier niet opgenomen) dat het aantal individuen toeneemt en dat het habitat van deze soorten sterk is toegenomen. Overall is daarmee de robuustheid van het beekstelsel sterk vergroot.

Samenvattend zijn beide beekherstelmaatregelen effectief om meer natuurlijke condities te creëren. Ondanks abrupt veranderde leefomstandigheden, zijn binnen twee jaar al positieve ontwikkelingen op soortniveau in de Hagmolenbeek te zien, terwijl het dood hout in de Hierdense Beek nog meer tijd nodig heeft om ecologische verbetering te kunnen constateren.

# 5

## DOORWERKING VAN DE RESULTATEN

### 5.1 KENNIS IN DE PRAKTIJK GEBRACHT

Beekherstel vond zijn oorsprong in de zeventiger en tachtiger jaren van de vorige eeuw. Na een periode van vooral aanplant van houtwallen is geleidelijk meer inzicht verkregen in de werking van de beek zelf en nog later in het beeld van een beek als onderdeel van haar omgeving. In 1994 is door Verdonschot et al. (1995) een uitgebreide kwalitatieve beekherstel handleiding geschreven waarin ook de ecologie achter beekherstel is beschreven. Deze handleiding is jarenlang het standaardwerk voor beekherstel geweest. Uit de ecologische en typologische onderzoeken aan beken in Nederland die hieraan ten grondslag lagen, komen een aantal factoren naar voren die bepalend zijn voor aanwezige beeklevensgemeenschappen. Deze factoren zijn door Verdonschot et al. (1995) en Verdonschot et al. (1998) geschematiseerd in het 5-S-model. Samenvattend beschrijft dit model de opbouw van een beekecosysteem. Vijf factorcomplexen zijn hierin onderscheiden: systeemvoorwaarden, stroming, structuren, stoffen en soorten. In de leidraad 'Beken stromen' is de toen beschikbare kennis vertaald in maatregelen voor ecologisch beekherstel.

Het lopend onderzoek aan beekherstel over de laatste 10 jaren heeft voortdurend geleid tot nieuwe inzichten. Eind 2009 benoemden Didderen et al. (2008), na het uitvoeren van de vierde vijfjarige beekherstel enquête, tien faal- en tien succesfactoren:

Faalfactoren:

- 1 Uitgevoerd op lokale schaal;
- 2 Gericht op één of slechts enkele milieucondities;
- 3 Vergeten de oeverzone en het beekdal te betrekken;
- 4 Gericht op slechts één organismegroep waarbij het ecosysteem van beek en beekdal als geheel is vergeten;
- 5 Verspreidingspotenties en -barrières zijn genegeerd;
- 6 Doelen van herstel zijn niet duidelijk geformuleerd;
- 7 Communicatie met betrokkenen ontbreekt;
- 8 Gebaseerd op historisch geografische inzichten in plaats van huidige en toekomstige milieumandvoorwaarden op landschaps- en lokale schaal;
- 9 Tegelijk verschillende maatregelen in de beek en het beekdal uitgevoerd die onderling strijdig zijn;
- 10 Monitoring niet uitgevoerd, waardoor tussentijdse bijstelling niet mogelijk was.

Het weten van deze faalfactoren vormt een belangrijk onderdeel van de onderzochte beekdalbrede integrale aanpak.

Succesfactoren:

- 1 Integraal uitgevoerd, omvat de gehele beek en het gehele beekdal;
- 2 Ingebed in de heersende, intrinsieke landschaps-/stroomgebiedsprocessen;
- 3 Herstelprocessen hebben de tijd gekregen. Houdt rekening met hiërarchie in sturende factoren tussen landschap/stroomgebied en standplaats/habitat;
- 4 Niet langs een algemene mal uitgevoerd, maar aan de lokale en regionale omstandigheden aangepast;
- 5 Onderbouwd met gedegen kennis van de processen in het beekdal (ecologische systeemanalyse);
- 6 Afgestemd op en waar mogelijk gecombineerd met andere gebruiksfuncties (onder andere recreatie) van beek en beekdal;
- 7 Open en duidelijk gecommuniceerd met betrokkenen en gebaseerd op een heldere, gedetailleerde beschrijving en gezamenlijke benadering;
- 8 Invulling van het toekomstig te voeren beheer en onderhoud, reeds in het planproces voorzien;
- 9 Omvat verschillende maatregelen in de beek en het beekdal, welke onderling afgestemd zijn, zodat een win-winsituatie ontstaat;
- 10 Begeleid met een solide monitoring; er wordt rekening gehouden met tussentijdse bijstelling.

De ervaringen uit het onderzoek en het in praktijk brengen van de beekdalbrede maatregelen, hebben bovengenoemde factoren in belangrijke mate bevestigd. De nu ingerichte praktijkvoorbeelden voldoen aan de richtlijnen en vuistregels voor de ontwikkeling en het beheer van een nieuw beekdalbreed herstelconcept. De kennis is dus niet alleen vergroot maar er zijn voorbeelden die in het veld bezocht kunnen worden.

## 5.2 INTEGRALE AANPAK VAN BEEKHERSTEL

### BELEIDSDOELEN

Tot 2015 worden er circa 2400 hermeanderingsprojecten uitgevoerd, daarna tot 2027 nog eens circa 4400. Meer dan 4600 km worden dus in de komende 15 jaar hermeanderd of krijgen natuurvriendelijke oevers. Recent onderzoek wijst uit dat ecologische kwaliteitsverbetering door de huidige aanpak van beekherstel sterk achterblijft (Verdonschot & Didderen, 2009). Deze hermeandering richt zich vaak op beektrajecten van beperktere lengte en wordt in ambitie beperkt doordat overstroming niet is toegestaan. Daarbij komt ook nog eens dat de gevolgen van klimaatverandering voor beken groot zullen zijn (Besse-Lototskaya et al., in prep.). De noodzaak om beken zodanig te verbeteren dat ecologische kwaliteitsverbetering optreedt, is daarom evident.

Herstel van beekdalecosystemen betekent het terugbrengen van ecosystemen naar een toestand die licht afwijkt van de oorspronkelijke- of referentietoestand (GET) en daarmee de wettelijke toestand die voldoet aan de kwaliteitseisen en normen van de KaderRichtlijn Water (KRW), Vogel- en Habitatrichtlijn (VHR) of andere doelen die volgen uit de inrichting van de Ecologische HoofdStructuur (EHS) of provinciale plannen. Veel beken in Nederland voldoen momenteel niet aan de ecologische kwaliteitsdoelen en normen gesteld vanuit de KRW.

Bij herstel van oppervlaktewateren wordt onmiddellijk gedacht aan het bijsturen van verstoorde milieufactoren zoals eutrofiëring, waterinlaat, morfologische degradatie en onnatuurlijk peilbeheer. Met de implementatie van de KRW zijn maatregelen en maatregelpakketten in een stroomversnelling gekomen. Echter, van veel maatregelen zijn de ecologische effecten nauwelijks onderzocht en veel maatregelen worden alleen solo uitgevoerd. Het terugbrengen van één verstoorde milieuparameter in zijn meer oorspronkelijke range leidt niet automatisch tot ecologisch herstel, omdat ecosystemen afhankelijk zijn van alle werkende factoren. Daarnaast heeft onderzoek aangetoond dat veel gebruikelijke maatregelen niet tot de gewenste resultaten leiden.

*Integrale aanpakken waarbij alle verstoringen in een stroomgebiedsbrede visie worden meegenomen zijn spaarzaam, maar noodzakelijk om verbeteringen te bereiken.* Kennis en ervaring, zeker op grotere schaal, ontbreekt. De KRW, WB21, EHS en Natura 2000 echter vragen om deze kennis en ervaring met de uitvoering.

### **VERGROTEN VAN ECOLOGISCHE BEEK(DAL)WAARDEN**

De gedempte afvoerdynamiek en de daarbij behorende erosie- en sedimentatieprocessen op microschaal in Nederlandse laaglandbeken, vormen de basis voor een hoge habitatheterogeniteit en dus een hoge beek- en beekdalbiodiversiteit. Natuurlijk kronkelende Nederlandse laaglandbeken bleven op macroschaal in het verleden lange tijd op ongeveer dezelfde plaats liggen. Alleen piekafvoeren die eens in de 5 tot 10 jaar optraden, waren aanleiding tot nieuwe macropatronen. De planten en dieren die van nature in Nederlandse beken floreerden, zijn aan dergelijke lager dynamische condities aangepast.

*Het is daarom uiterst belangrijk te realiseren dat demping van de huidige te hoge en te lage extremen in afvoerdynamiek door beekdalbrede hermeandering in belangrijke mate bijdragen aan het voortbestaan en het verbeteren of de terugkeer van de levensvoorwaarden van veel beekplanten en -dieren.*

In dit tussenrapport zijn de eerste positieve resultaten gepresenteerd die deze stelling ondersteunen. De grenswaarden in hoge en lage afvoeren en bijhorende stroomsnelheden en structuurvariatie zullen in de vorm van vuistregels na het einde van het tweede deel van dit onderzoek in een handleiding worden ingebouwd/vastgelegd.

### **5.3 WINSTEN DOOR DE NIEUWE AANPAK**

De onderzochte maatregelen hebben laten zien dat voldoende stroming in de beek wordt bewerkstelligd en dat daarmee tegelijk de zelfschoning van de beek verbetert. Dit betekent dat het onderhoud vermindert dan wel achterwege kan blijven naarmate beekbegeleidend hout verder ontwikkelt. Voortschrijdende extensivering van onderhoud betekent een besparing van kosten. Natuurlijke beken die in het hout staan, vragen geen onderhoud (kan na 7-15 jaren worden bereikt). Onderhoud extensiveren op zichzelf draagt ook bij tot verbetering van de structuurrijkdom in de beek, zo blijven ingevallen bomen, takken en blad in de beek en dragen ze daarmee bij aan verbetering van de EKR.

Het verbreden van het beekdal en het ontwikkelen van nieuwe (water)natuur leidt tot verbetering van de ruimtelijke kwaliteit (vergroting van ecosysteemdiensten).

De beekdalbrede hermeandering levert tevens een belangrijke bijdrage als aanvullende maatregel voor waterberging. Waterberging, ook bovenstrooms in boven- en middenoren, leidt niet alleen tot minder wateroverlast ter plekke, maar draagt ook in belangrijke mate bij aan de bescherming van benedenstroomse delen, vaak stedelijke/bebouwde gebieden. Dit impliceert het voorkomen van schade bij overstromingen in bewoonde gebieden en het voorkomen van noodzakelijk terugkerend onderhoud aan de huidige waterlopen.

De onderzochte maatregelen hebben meerwaarde laten zien, zoals:

- Met een verbreed winterbed in een tweefasenprofiel wordt stroming in het zomerbed meer *gedempt* en kan *onderhoud verminderen*. In de winter en bij extreme zomerpieken wordt *wateroverlast voorkomen*. Het van een zomerbed voorziene tweefasenprofiel *verbetert ook de stromingscondities* in de beek bij lagere afvoeren;
- Het verbrede winterbed houdt hoge afvoeren binnen boorden, terwijl tegelijk de beekbodem ondieper ligt en verdroging van het beekdal wordt verminderd. Het verbrede winterbed draagt bij aan *grondwaterstandsverhoging* creëert een *gradiënt van nat naar droog* in het beekdal;
- Het is gebleken dat het verbrede winterbed zo vlak mogelijk moet worden ingericht. Het afgevlakte winterbed fungeert als *waterretentiegebied* en verhoogt de bergingscapaciteit;
- Het verbrede winterbed laat ontwikkeling van ruigtebegroeiing en houtige gewassen zien. Deze laatste gaan op termijn de beek *beschaduw*en wat verder bijdraagt aan verbetering van de ecologische kwaliteit. Hoge kruiden en houtigen leiden ook tot vergroting van de *structuurvariatie* in de beek (verbetering ecologische kwaliteit) en tot *demping van de temperatuurfluctuaties* in het beekwater. Constantere en lagere temperaturen dragen bij aan een verbetering van de ecologische omstandigheden. Dit levert tevens een bijdrage aan de klimaatbestendigheid van het beekstelsel;
- Het inbrengen van dood hout heeft laten zien dat *variatie in stromingsprocessen en vorming van allerlei structuren* (habitat heterogeniteit) leidt tot diversifiëring van leefmilieus en legt daarmee een basis voor een hogere soortdiversiteit. Dood hout en materiaal dat dood hout invangt dient als *voedsel voor het beekecosysteem*;
- Daarnaast is een positief resultaat te boeken in termen van waterberging door het inbrengen van dood hout, zeker als inundaties in beekbegeleidende laagtes toegestaan gaat worden;
- Het inbrengen van dood hout laat een *grote kostenbesparing* zien, omdat met eenvoudige ingrepen grote ecologische winst wordt behaald.

De winst van het beekdalbrede ingerichte beekprofiel, wordt veel rendabeler indien ook wordt gezorgd voor een verbeterde bovenstroomse afstroming (waterconservering in de haarvaten) en het vasthouden van water in beekbegeleidende zones zoals beekmoerassen en andere natte (natuur). Naar schatting zou dit betekenen dat:

- De droogteschade kan verminderen van 0,5-12% (gemiddeld circa 2%) in de landbouw op een areaal van 8-10% van het stroomgebied;
- Een waterwinst (extra water in de bodem) van gemiddeld 40 m<sup>3</sup>/ha op het gehele stroomgebied aan het eind van de zomer kan worden bereikt. De werkelijke winst is groter omdat het voorjaar/zomer natter begint. Dit is derhalve een structurele waterwinst.

#### 5.4 DOORWERKING NAAR ANDERE BEKEN

Beekherstel staat dankzij de implementatie van de KRW in grote belangstelling in binnen- en buitenland. De toepasbaarheid en herhaalbaarheid van de onderzochte maatregelen op andere beekdalen is zeer groot. De maatregelen zijn zodanig gekozen dat zij (eventueel in combinatie) zelfs als aanvullende maatregelen kunnen worden ingepast in voorgenomen of reeds in uitvoer zijnde beekherstelprojecten. De onderzochte maatregelen gelden voor de laaglandbeken in Nederland maar kunnen in de gehele Noord- en West-Europese laagvlakte worden toegepast. De in het project opgebouwde kennis, biedt Nederland en de omliggende landen een wetenschappelijke basis en praktische instrumenten voor beekdalbreed herstel.

Het veralgemeniseren van de werkwijze rondom beekdalbreed werken (integraal systeem denken in de praktijk) en het verbreden van de ervaring en kennis naar andere, voor de KRW relevante, oppervlaktewateren draagt in belangrijke en kosteneffectieve wijze bij aan waterkwaliteitsverbetering. Opschaling is mogelijk:

- Voor de hoge en lage afvoeren en bijhorende stroomsnelheden kan gewerkt gaan worden met verhoudingen van de mediane afvoer(waterdiepte): stroomsnelheid. Deze verhoudingen worden geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd naar andere beeksystemen met andere afvoeren. Voor de vorm van beekbedding wordt de kennis uitgedrukt in breedte: diepte-verhouding van het zomerbed en het winterbed, en het percentage zich ontwikkelende of aanwezige houtige en organische structuren. Beide parameters worden opgeschaald naar andere beken door de resultaten van dit onderzoek te extrapoleren. De relaties tussen gewenste afvoeren en vormen van beekbedding worden in eenvoudige modelmatige vormen vastgelegd.

## 5.5 INNOVATIEVE KERNUITGANGSPUNTEN

De met dit onderzoek samenhangende innovatie leunt op de volgende bouwstenen:

### 1 *Stroomgebiedsbenadering*

De onderzoeksresultaten ondersteunen het uitgangspunt dat herinrichting en ontwikkeling van beeksystemen een aanpak vereist die gericht is op het gehele stroomgebied.

### 2 *Het verbinden van beek met beekdal*

De beekdalbrede aanpak verbindt de beek weer met het beekdal en geeft ruimte aan evenwichtige en samenhangende hydrologische, morfologische en ecologische processen van het gehele beekstelsel. Deze koppeling is sterk gewenst omdat de beekbegeleidende vegetatie niet alleen biodiversiteit toevoegt, maar ook een rol speelt in de waterkwaliteitshuishouding van de beek. Een beekdalbrede benadering biedt hiertoe kansen doordat het afstromend water wordt gefilterd door de beekdalbegeleidende vegetatie. Naast vermindering van bemesting heeft de aanleg van bufferzones langs de beek positieve gevolgen voor de waterkwaliteit.

### 3 *Gedempte afvoerdynamiek en continue stroming*

Beekherstelmaatregelen vragen het verhogen van de beekbodem, het versmallen van de beekbedding, het ruimte geven aan inundatie en het laten ontwikkelen of aanplanten van bomen die het herstelproces nog verder versnellen. Door inundatie wordt de beek gedempt in afvoerdynamiek en worden droog-natgradiënten in het beekdal in belangrijke mate hersteld. Inundatiezones bieden tegelijk mogelijkheden voor kleine profielen, zodat bij lage afvoeren de beek toch blijft stromen.

### 4 *Hydromorfologie in balans*

Beekdalbreed herstel stoelt op in evenwicht zijnde kleinschalige erosiesedimentatieprocessen. Dit betekent dat beken slechts langzaam in het landschap bewegen.



## 5.6 AANVULLENDE POSITIEVE EFFECTEN

Het is onvermijdelijk dat bij een beekdalbrede herinrichting méér ruimte wordt ingenomen. In veel gevallen gaat dat ten koste van de aangrenzende (landbouw)gronden. Daar staat echter een groot aantal voordelen tegenover:

- Ruimte voor (her)meandering;
- Ruimte voor overstroming;
- Verbetering waterkwaliteit;
- Verhoging van de waterbergingscapaciteit;
- Vermindering van erosie en insnijding;
- Opvang van afspoelend materiaal ;
- Op- en afvang van voedingsstoffen en toxische stoffen;
- Verhoging van de klimaatbestendigheid;
- Toename van de biodiversiteit;
- Verhoging van kansen voor bijzondere plant- en diersoorten;
- Verbindingsfunctie voor planten en dieren;
- Recreatieve en esthetische waarde en medegebruik.

De toename van de biodiversiteit vertegenwoordigt een breed scala aan bijkomende voordelen, waaronder een grotere natuurlijke veerkracht van het hele gebied, een grotere variatie aan planten en dieren, en het voorkomen van plagen en ziekten. Een natuurlijk beekdal is dus niet alleen voor planten en dieren een positieve leefomgeving. Ook mensen profiteren met een betere gezondheid. Zo is het beekdalbreed ingericht gebied een afvanger voor fijn stof. Steeds meer aandacht van burgers en politiek gaat uit naar een aantrekkelijk landschap, met een steeds grotere functie en prioriteit voor recreatie. Voor het combineren van de verschillende functies van het landschap (stedelijk, agrarisch, recreatief, natuurlijk) en de maatschappelijke inpassing van de diverse belangen, geeft de ontwikkeling van de beekdalbrede aanpak grote kansen voor duurzame omgeving.

De huidige beken worden steeds kwetsbaarder voor de effecten van klimaatverandering. Om deze effecten op te vangen is de beekdalbrede aanpak nodig, omdat het de beken klimaatbestendiger maakt. De bedreiging van klimaatverandering raakt precies de factoren die in dit onderzoek centraal stonden. Beekdalbrede systemen zijn veerkrachtiger en klimaatbestendiger. Dit is een win-winsituatie.

Baten voor andere sectoren zijn door Vikolainen et al. (2008) geanalyseerd. Uit de elf bekeken beekprojecten blijkt dat waterbeheer vaak wordt gecombineerd met de volgende sectoren:

- Natuur- en landschapsontwikkeling: de aanleg van de Ecologische Hoofdstructuur, ecologische verbindingszone, uitloopgebied t.b.v. de nieuwe wijken;Recreatie: fiets- en wandelroutes, watersport, recreatieve centra's (bezoekerscentrum, ontspanningscentrum, enz.), natuurbeleefpunten (vogelkijkhutten, enz.), informatieve voorzieningen (infoborden), stranden, enz.;
- Landbouw: het realiseren van een duurzame uitgangssituatie voor de landbouw door betere verkaveling van de landbouwgronden;Woning- en kantoorbouw: het ontwikkelen van onroerend goed als manier van opwaarderen van de omgeving en de regio.

Deze extra baten leveren een versterking van de economische positie van Nederland op. Het kwantificeren van deze baten is moeilijk. Zo indexeerden Bade et al. (2008) de stijging van de WOZ-waarde van woonhuizen in de directe omgeving op 15%.

## 5.7 SAMENWERKING ONDERZOEK-PRAKTIJK

### ORGANISATIE

Het onderzoek is niet in één richting uitgevoerd, maar de praktijk is steeds direct betrokken geweest. De waterschappen als praktijkpartijen hebben een belangrijke sturende rol in het ontwikkelingsproces gehad. Het onderzoek werd inhoudelijk aangestuurd door Alterra en het Waterschap Veluwe zorgde als penvoerder voor de administratieve leiding. De STOWA was verantwoordelijk voor de communicatie. De deelnemers uit deze drie organisaties vormden samen het kernteam dat het project leidde en afstemde met de gehele projectgroep.

De afgelopen 2 jaar is zeer intensief en constructief samengewerkt tussen de zeven waterschappen en de drie onderzoeksgroepen, zowel in het projectbijeenvolgenverband als bilateraal. Iedere deelnemende partij heeft minimaal één projectbijeenvolgenkomst (in totaal negen projectbijeenvolgenkomsten) georganiseerd, waarbij hun eigen praktijkproject is gepresenteerd, besproken en bezocht (in het veld). De uitwisseling van de ervaringen en kennis, maar ook het gezamenlijke brainstormen hebben bijgedragen aan afstemming en vorming van de nieuwe visie op beekherstel. Parallel is er een samenwerkingslijn ontstaan tussen de drie onderzoeksgroepen (Alterra, Wageningen Universiteit en Utrecht Universiteit), vooral gericht op de inhoudelijke afstemming.

### KENNISOVERDRACHT

Veel kennis van de kennisinstellingen is tijdens en buiten de vergaderingen naar de waterschappen overgedragen. De waterschappen hebben hiermee hun nieuwe herstelplannen bijgesteld. De onderzoekers zijn hierdoor dicht bij de praktijk komen staan. Over 2 jaar mondt dit gehele project uit in een *Leidraad Beekdalen Stroom: en handboek voor beek- en beekdalherstel*.

### WINST DOOR SAMENWERKING

Betrokken partijen in het onderzoek hebben de samenwerking geëvalueerd. De uit deze evaluaties voortgekomen meerwaarde van dit project is hierna in enkele citaten geïllustreerd: Waterschap Peel en Maasvallei: Er bestaat intern een positief beeld over de effectiviteit van de maatregel 'inbrengen van dood hout'. Er is meer inzicht in wetenschappelijke kennis over beekherstel en uit ervaringen vanuit andere waterschappen verkregen. Er zijn nieuwe inzichten voor het inrichten van beekherstelprojecten verkregen door de uitwisseling tussen onderzoek en waterschap;

Waterschap de Dommel: Het waterschap De Dommel is kritischer gaan kijken naar het beekontwerp;

Waterschap Vallei en Veluwe: De resultaten in het veld die voortkomen uit dit project, kunnen als model gaan dienen voor de in de toekomst uit te voeren herstelwerkzaamheden aan beken. Door het onderzoek te combineren met het uitvoeringsproject, heeft er meer kruisbestuiving plaats gevonden tussen de specialismen ecologie, hydrologie en het projectmanagement; Waterschap Aa en Maas: Het door waterschappers begrijpen van welke sleutelfactoren bij beekherstel als randvoorwaarden dienen, is vergroot. Vuistregels en handvaten voor morfologische inrichting bij beekherstel zijn verkregen. Theorie en praktijk samen hebben voor een goed ontwerp gezorgd; Waterschap Hunze en Aa's: De combinatie van wetenschappelijke partners en beheerders uit de praktijk heeft de kans geboden om techniek en wetenschap met elkaar te verbinden en gezamenlijk te zoeken naar uitvoerbare en wetenschappelijk onderbouwde oplossingen.

De kennisinstellingen hebben onderling in de keuken van elkaars disciplines gekeken en dit heeft geleid tot versterking van samenwerking en verdere vernieuwing van ieders aanpak.

### DOORWERKING VAN DE PRAKTIJKEXPERIMENTEN NAAR ANDERE INSTELLINGEN

Staatsbosbeheer, Overijssels Landschap, Natuurmonumenten, Brabants Landschap en particuliere landeigenaren zijn allen op enige wijze betrokken geweest bij een of meerdere projecten en hebben de positieve ervaringen inmiddels in hun organisaties verder gebracht.

Binnen een kleinschalig herinrichtingsproject (bijvoorbeeld bij Waterschap Peel en Maasvallei in de Haelense Beek) is reeds opgenomen in het bestek dat een aantal eiken die moeten worden gerooid, in de beek worden toegepast. Ook in andere grotere projecten (bv. Loobeek, Snelle Loop) wordt er in de planvorming over het aanbrengen van hout nagedacht.

### VERVOLG SAMENWERKING

Alle deelnemers hebben uitgesproken om de succesvolle eerste resultaten van dit project t.a.v. inhoud, proces en samenwerking voort te zetten. De onderzoekers gaan over 2 jaar alle resultaten uit het onderzoek vertalen naar praktische uitvoerings- en inrichtingsadviezen richting de waterbeheerders.

Er wordt door onderzoeksinstituten en waterschappen gezamenlijk een ‘ladder van belangrijkheid’ opgesteld om het hiërarchisch belang van te herstellen factoren en processen te benoemen en in de praktijk te testen. Deze ladder gaat onderdeel worden van de *Leidraad Beekdalen Stroom*.

# 6

## REFERENTIES

- Bade T., Enzerink R. & Schroeff O. van der (2008). Blauw betalen voor Welvaart. Over de economische betekenis van Waterschap Veluwe. Triple E Prod., Waterschap veluwe. 108 pp.
- Didderen, K., P.F.M. Verdonshot, B.P.F.J.M. Knegt, A.A. Besse-Lototskaya (2009): Enquête beek(dal)herstelprojecten 2004-2008. Evaluatie van beekherstel over de periode 1960-2008 en analyse van effecten van 9 voorbeeldprojecten. Wageningen, Alterra, rapport 1858.
- Gordon, N.D. McMahon, T.A. & Finlayson B.L. (1992). Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists, Wiley, New York, 526 pp.
- Higler L.W.G., Beijer H.M. & Van der Hoek W.F. (1995). Ecosysteemvisie Beken en Beekdalen. IBN/IKC-NBLF, Leersum-Wageningen.
- Ligtvoet W., G. Beugelink, C. Brink, R. Franken & F. Kragt (2008): Kwaliteit voor Later. Ex ante evaluatie Kaderrichtlijn Water. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven. PBL publicatienummer 50014001/2008. 215 pp.
- Verdonshot P. et al. (red.) (1995): Beken stromen. Leidraad voor ecologisch beekherstel. Werkgroep Ecologisch Waterbeheer, subgroep Beekherstel, WEW-06. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, STOWA 95-03, Utrecht. 1-236.
- Verdonshot P.F.M., Driessen J.M.C., Mosterdijk H.G. & Schot J.A. (1998): The 5-S-Model, an integrated approach for stream rehabilitation. In: H.O. Hansen & B.L. Madsen, River Restoration '96, Session lectures proceedings. International Conference arranged by the European Centre for River Restoration: 36-44. National Environmental Research Institute, Denmark.
- Vikolainen V., Coenen F. & Lulofs K. (2008): Baten van Waterbeheer voor regionale innovatie en regionale economie. Centrum voor Schone Technologie en Milieubeleid. Univ. Twente. 67 pp.