

FACTSHEET KIWK

Basisafvoer verhogen



Piet F.M. Verdonschot & Ralf C.M. Verdonschot

Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research

November 2020

Auteurs

Verdonschot P.F.M. & Verdonschot R.C.M. (correspondentie: piet.verdonschot@wur.nl)

Opdrachtgever

Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK)

Projectgroep

Gebruikerscommissie Kennisimpuls waterkwaliteit Systeemkennis ecologie en waterkwaliteit

Leesgroep

Tom Buijse (Deltares), Peter van Puijenbroek (Planbureau voor de Leefomgeving), Dorien Roubos (Waterschap Vallei & Veluwe)

Wijze van citeren

Verdonschot P.F.M. & Verdonschot R.C.M. (2020). Factsheet: Basisafvoer verhogen. Kennisimpuls Waterkwaliteit. Notitie Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK), Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen. 15 pp.

Trefwoorden

Stroomgebieden, Systeemvoorwaarden, Brongerichte maatregelen, Water conserveren, vasthouden, bergen en vertraagd afvoeren

Beeldmateriaal

Piet Verdonschot

DOI: <https://doi.org/10.18174/534364>

Dit project is uitgevoerd in opdracht van de Kennisimpuls waterKwaliteit (KIWK).

© 2020 Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Inhoud	1
1 Inleiding	2
2 Effecten	2
2.1 Basis-, piek- en lage afvoer	2
2.2 Effecten op andere sleutelfactoren in het waterecosysteem	2
2.3 Ecologische Responsen	3
3 Maatregelen	4
3.1 Het uitvoeren van een stroomgebiedsbrede ecologische systeemanalyse (SESA)	6
3.2 Het verminderen van drainerende structuren en het verbeteren van de infiltratie	7
3.3 Het bergen van een (piek)afvoer	8
3.4 Het vertragen van (versnelde) oppervlakkige afvoer	8
3.5 Het verminderen van wateronttrekkingen	9
3.6 Het verbinden van de beek met het beekdal en het infiltratiegebied	9
3.7 Het verlengen van de weglengte van de beek	9
3.8 Het verondiepen van het beekprofiel en het vertragen van de afvoer door obstakels	10
3.9 Het afstemmen van lozingen uit RWZI's op gewenst afvoerregime	11
4 Samenvatting	11
5 Literatuur	11

1 Inleiding

De vraag vanuit de landbouw om in de winter water versneld af te voeren en in de zomer vast te houden en aan te vullen, gecombineerd met het groeiend gebruik van grondwater voor onder andere beregening, industriële processen en drinkwaterwinning hebben de waterhuishouding op de hogere zandgronden stuurbaar en tegelijk kwetsbaar gemaakt. Veel van de huidige watergangen zijn gegraven op plekken die van nature niet of hooguit oppervlakkig afwaterden. Daarnaast zijn veel bestaande watergangen sterk verruimd en verdiept, waardoor in droge perioden de grond- en oppervlaktewaterbeschikbaarheid sterk is afgenomen en in natte perioden wateroverlast kan optreden (Verdonschot et al. 2017). Deze kwetsbaarheid wordt als gevolg van klimaatverandering steeds duidelijker zichtbaar, met meer droogteperioden en hevige buien in de zomer en nattere winters (KNMI, 2015).

De ecologische effecten van droogteperioden en extreme afvoeren zijn groot. Droogteperioden leiden meestal eerst tot stagnatie door het wegvallen van de afvoer, met vaak een zuurstoftekort in de watergang tot gevolg en dan tot het verdwijnen van het water, wat funest is voor aquatisch leven (Lake 2003, Verdonschot et al. 2015, KIWK Factsheet Droogte – Verdonschot & Verdonschot 2020).

Wanneer extreme afvoeren in een watergang optreden leidt dit tot het ontwortelen of afbreken van planten en het eroderen van de beekbodem en de oevers, waarbij ook de aanwezige waterorganismen (micro- en macrofauna) wegspoelen (Poff et al. 1997). Buiten de watergang verdrogen de lagere gronden rondom de watergang door de daling van oppervlaktewaterpeil en het wegzakken van het grondwater, wat leidt tot het verlies van grondwaterafhankelijke ecosystemen (Garssen et al. 2017). Extreem hoge afvoeren kunnen leiden tot langdurige overstroming van aanliggende gronden, waardoor verdrinking kan optreden van planten (bijvoorbeeld zomeroverstroming tijdens de bloei) en dieren.

2 Effecten

2.1 Basis-, piek- en lage afvoer

De basisafvoer vormt een relatief kleine component van de totale jaarlijkse afvoer, maar is belangrijk voor het behouden van de watervoerendheid en voldoende stroomsnelheid tijdens droge perioden. De basisafvoer in een stroomgebied wordt bepaald door de actuele neerslag en verdamping, de bergingscapaciteit en de hoeveelheid water die wordt geborgen in de ondergrond en in het oppervlaktewatersysteem, de diepe kwel- en wegzijgingsfluxen en onttrekkingen van grond- en oppervlaktewater. De basisafvoer is het gevolg van een relatief constante aanvoer vanuit het grondwater en wordt voor een groot deel bepaald door de grondwaterstand. Over het algemeen geldt dat hoe hoger het grondwaterpeil is t.o.v. het maaiveld, hoe hoger de basisafvoer is. De grondwaterstand wordt voor een groot deel bepaald door meerjarige neerslag en verdamping, maar ook andere factoren zijn van belang, waaronder het begroeiingstype (gewasfactor verdamping), het (micro)reliëf in het landschap, de maaiveld- en bodemcondities (permeabiliteit), de drainage van (ondiep) grondwater door het oppervlaktewatersysteem en de diepe kwel of wegzijging vanuit of naar omringende gebieden (Hendriks et al. 2014). In hoeverre water de kans krijgt om te infiltreren in de bodem of (ver)sneld naar de watergang afstroomt hangt af van de bodempermeabiliteit (hoe groter, hoe meer water kan infiltreren) en de drainage (hoe meer drainage, hoe meer infiltrerend water wordt afgevangen en afgevoerd naar de watergang).

Piekafvoeren treden tijdens en na perioden met veel neerslag op en ontstaan op plaatsen waar de neerslag niet kan infiltreren in de bodem. Het gaat daarbij om gebieden waar de grondwaterstand aan het maaiveld staat en dus de bodem volledig is verzadigd, oppervlakken met een zeer lage permeabiliteit aan het oppervlak (verharde oppervlakten, kleibodems, dichtgeslagen bodems t.g.v. agrarisch landgebruik, sterk geërodeerde gebieden) en watervoerende watergangen (Brauer et al. 2011).

Stagnatie en droogval treden op wanneer de drainagebasis van de watergang wegvalt, m.a.w. als het grondwaterpeil onder de bodem van de watergang is weggezakt en er onvoldoende aanvoer van bovenstrooms naar de watergang optreedt (Garssen et al. 2014).

2.2 Effecten op andere sleutelfactoren in het waterecosysteem

Veranderingen in de basisafvoer hebben zowel direct als indirect invloed op verschillende sleutelfactoren:

1. Stroming. Veranderingen in de basisafvoer hebben invloed op de waterbeschikbaarheid en daarmee op de stroomsnelheid (afname: stagnatie-droogval; toename: toename stroming, turbulentie en eroderende kracht) (Verdonschot & van den Hoorn 2010).
2. Temperatuur. De temperatuur wordt zowel beïnvloed door een afname van de stroming, waarbij een kleiner watervolume met geringere diepte ontstaat, als bij een vermindering of het wegvallen van de toevoer van relatief koud grondwater. Beide leiden tot een verhoging van de watertemperatuur en grotere temperatuurfuctuaties, omdat de watertemperatuur sterker de luchttemperatuur gaat volgen, de instraling groter wordt en de afkoeling door grondwater vermindert. Wanneer de stroomsnelheid toeneemt blijft de watertemperatuur langere tijd lager door een hogere toevoer van grondwater en een snellere doorvoer van water met vaak een hogere turbiditeit, waardoor er minder opwarming door instraling kan optreden (Matheswaran et al. 2015).
3. Substraten. Een toename van stroming leidt vaak tot erosie en transport van materiaal. Dit werkt in eerste instantie vaak verrijkend, wanneer bijvoorbeeld de zuurstofvoorziening verbetert of grindbedden ontstaan. Daarentegen leiden extreme stroomsnelheden juist tot het wegspoelen van takken, boomstammen en dergelijke, en daarmee het verdwijnen van ecologisch relevante structuren (Jones & Smock 1991). Het wegvallen van stroming leidt meestal tot sedimentatie, waardoor verslibbing optreedt en de aanwezige habitatheterogeniteit verdwijnt omdat slib specifieke substraten (zand, blad) bedekt (Wood & Armitage 1999).
4. Zuurstof. Stagnatie en droogval leiden tot hogere watertemperaturen, lagere stroomsnelheden en daardoor een lagere zuurstofbeschikbaarheid. Door ophoping van slib en organisch materiaal wordt de afbraak versterkt en daalt de zuurstofbeschikbaarheid nog verder met als mogelijk gevolg het vrijkomen van voor organismen toxische verbindingen (Verdonschot et al. 2015). Verhoging van de stroomsnelheid leidt ten eerste vaak tot meer zwevende deeltjes in de waterkolom, die de productie van zuurstof door een vermindering van de hoeveelheid licht verlagen en ten tweede tot een hogere turbulentie in het water, wat de zuurstofbeschikbaarheid juist doet toenemen (O'Connor & Lake 1994). Door deze combinatie van factoren ontbreekt een duidelijke relatie vaak in de praktijk (Rajwa-Kuligiewicz et al. 2015).
5. Stoffen. In stromende wateren heeft de afvoer een grote invloed op de beschikbaarheid van stoffen. De relatie tussen opnamesnelheid van stoffen door organismen t.o.v. de vracht (concentratie per tijdseenheid) bepaalt de hoeveelheid stoffen die aan het water onttrokken wordt (Newbold et al., 1981). In beken is bij toenemende afvoer de opname in toenemende mate lager dan de passerende vracht. Dit betekent dat bij piekafvoeren veel opgeloste stoffen als het ware door het bekenstelsel spoelen (Evans & Johnes 2004), terwijl ze bij lage afvoer juist beter kunnen worden opgenomen.
6. Connectiviteit. Bij hoge afvoeren wordt de connectiviteit in stromende wateren sterk vergroot, zeker als de waterpeilen boven en beneden een stuw gelijk zijn, waardoor er feitelijk sprake is van een vrije afvoer. Tijdens lage afvoeren daarentegen wordt de connectiviteit binnen een bekenetwerk direct negatief beïnvloed. Stuwten zonder passage-voorzieningen, maar ook trajecten waar stagnatie en droogval optreden worden in dat geval voor veel organismen onneembare barrières, waardoor verspreiding en herkolonisatie onmogelijk worden.

2.3 Ecologische Responsen

Oorspronkelijk ontsprongen de beeksystemen in Hoog-Nederland in bron- en kwelgebieden of in venen en moerassen. Bovenstrooms (in de lengterichting) bevonden zich diffuse afvoersystemen en langs de beken (in de dwarsrichting) begeleidende moerassystemen. De overgangen tussen beek en beekdal waren gradueel. De beeksystemen waren rijk aan kleinschalige hydrologische, morfologische, chemische en ecologische gradiënten en biodiversiteit en speelden een grote rol in het vasthouden en bergen van water. Het bekenetwerk bestond uit gevarieerde stromingsstelsels met vertakkingen in de loop, complexen van poelen en slenken, tijdelijke inundatiezones en stroming door en over de beekdalbodem. Verspreid in het stroomgebied kwamen ook afvoerloze laagtes voor. De beken zelf stroomden traag en met een beperkte afvoerdynamiek af naar de lagergelegen delen via middenlopen, benedenlopen en riviertjes naar de grote rivieren. De beboste stroomgebieden op de zandgronden, al dan niet met lokale veengebieden, werkten als een spons waarin veel water werd geïnfilteerd naar de ondergrond (grondwater vasthouden) en geborgen aan het oppervlak (water bergen in natte laagtes). Vooral de natuurlijke begroeiing zorgde ervoor dat oppervlakkige afstroming van water werd vertraagd en de infiltratie verder versterkt (Higler 1993). Omdat de beken hierdoor een gedempte dynamiek in de afvoer kenden, zijn beekorganismen evolutionair aan deze relatief stabiele omstandigheden aangepast (Lytle & Poff 2004).

De ecologische effecten van hoge afvoeren zijn te verdelen in de effecten die optreden in de watergangen en effecten op de geïnundeerde beekdalen. Hoge afvoeren leiden tot hoge stroomsnelheden, met twee belangrijke effecten op organismen: 1.) een direct effect op organismen door deze te beschadigen (in het geval van macrofyten) of doden via uitschuring, begraven in sediment en wegspoeling naar ongeschikt habitat (catastrofale drift) en 2.) een indirect effect door veranderingen in habitatstructuur, voedsel- en nutriëntenbeschikbaarheid voor organismen via transport of depositie van sediment, organisch materiaal en nutriënten (McCabe 2000). Dergelijke afvoeren homogeniseren tevens voor langere tijd de beekbedding, waardoor suboptimale levensomstandigheden voor soorten ontstaan (Westveer et al. 2017). Bij een toename van de stroomsnelheid spoelt fijn sediment weg en komt meer grof zand en grind vrij. Omdat deze grove sedimenten vaak arm aan nutriënten en organisch materiaal zijn, kan de groei van macrofyten worden bemoeilijkt (Barko & Smart 1986, Madsen et al. 2001). Afvoerpieken bieden echter ook mogelijkheden voor organismen, bijvoorbeeld door nieuw habitat te creëren via de aanvoer van nieuw materiaal van stroomopwaarts. Zo kan tijdens een piekafvoer grof organisch materiaal (bladeren, takken en stammen) vanuit de oeverzone de beek in spoelen. Dit hoopt zich op in de stroomgeul en vormt daar organische dammen. De aanwezigheid hiervan heeft vervolgens grote effecten op de morfologie van de bedding, de afvoer, de stroomsnelheid, de habitatdiversiteit, de soortensamenstelling en abundantie van macrofauna en het verloop van ecosysteemprocessen (Bilby & Likens 1980, Smock et al. 1989, Poff et al. 1997, Palmer et al. 2000). Echter, piekafvoeren kunnen ook tot gevolg hebben dat deze dammen juist wegspoelen (Carpenter et al. 1992). Wanneer er in dat geval geen nieuwe aanvoer plaatsvindt, heeft dit een lokale afname van de habitatdiversiteit en/of voedselbeschikbaarheid tot gevolg.

Algemeen wordt aan- en waargenomen dat de inundatie van beekbegeleidende zones leidt tot eutrofiëring, omdat de meest frequent geïnundeerde gebiedsdelen vaak ook de meest eutrafente vegetaties bevatten. Bij inundatie is in de aanvoerroute van voedingsstoffen een onderscheid nodig tussen de externe aanvoer van voedingsstoffen in opgeloste of in gebonden vorm (slib) door de beek en het intern vrijkomen van voedingsstoffen uit de overstroomde bodem. Daarbij spelen verschillende factoren een rol, zoals het seizoen, of de bodem al water verzadigd is of niet en verschillen tussen de aangevoerde opgeloste of gebonden nutriënten. In de zomer dringen voedingsstoffen door in de bodem (Baattrup-Pedersen et al. 2013), in winterperiode is de eutrofiëring door inundatie nihil (Olde Venterink 2000), maar leidt het vaak wel tot het vrijkomen van fosfaat bij ijzerreductie (Lamers et al. 2006, Banach et al. 2009). Dit kan ten goede komen aan de vegetatie, maar kan bij afstromen ook weer in de beek terecht komen, zoals bijvoorbeeld in de Geeserstroom is waargenomen. Kwelverzadigde bodems laten geen inundatiewater toe en binden vaak fosfaat, waardoor deze minder snel eutrofiëren dan sterk infiltrerende bodems. Aan slib gebonden voedingsstoffen vormen waarschijnlijk één van de belangrijkste bronnen van eutrofiëring bij inundatie.

In Hoog-Nederland komen van nature droogvallende beektrajecten voor, vooral in de bovenlopen van door regenwater gevoede systemen. Van nature droogvallende wateren bevatten kenmerkende macrofaunasoorten met speciale aanpassingen (Lytle 2008). Aanpassingen om te overleven tijdens de droogteperiode kunnen worden onderverdeeld naar aanpassingen in de levenscyclus (droogte synchronisatie), fysiologische aanpassingen (tolerantie voor lage zuurstofconcentraties, hoge ionengehalten, uitdroging) en gedragsaanpassingen (zomerdiapauze, migratie, grote kolonisatiecapaciteit). In permanente beken komen soorten met speciale droogte-aanpassingen minder voor, waardoor droogte in dit type beken vaak veel grotere effecten teweegbrengt. Soorten met speciale aanpassingen ontbreken en soorten zonder die aanpassingen zullen verdwijnen. Na de droogte zullen verdwenen soorten weer moeten herkoloniseren. Het succes van herkolonisatie hangt af van de grootte van de bronpopulaties, de afstand, de barrières tussen bronpopulatie en droogte traject. Daarnaast veranderen tijdens het proces van droogval en vernatting de biologische interacties tussen soorten wat zowel positief en negatief voor de kolonisten kan uitpakken. Ook veranderen de milieu-omstandigheden door de droogte waardoor andere soorten mogelijk kansen krijgen. Voor meer informatie over droogvallende beken (KIWK Factsheet Droogte – Verdonschot & Verdonschot 2020).

3 Maatregelen

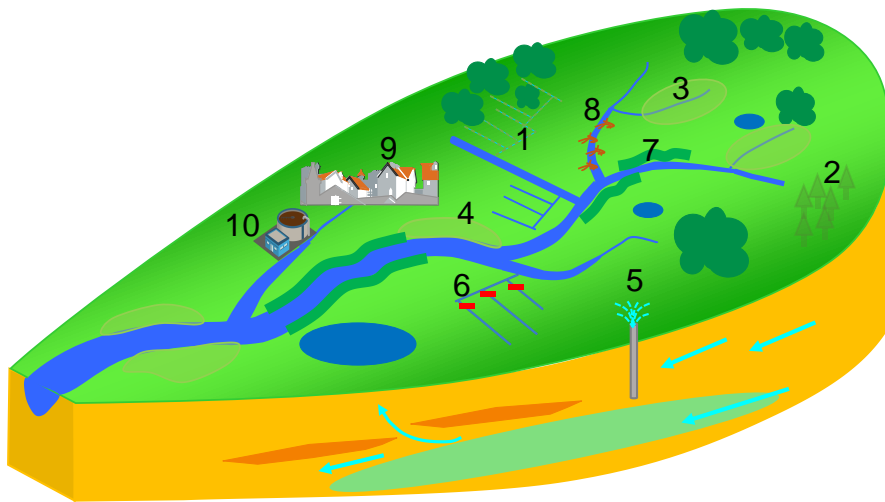
Langzaam stromende Nederlandse beken op zand worden een groot deel gevoed vanuit het grondwater. Om de afvoerdynamiek te dempen zullen, naast aanpassingen aan de morfologie en begroeiing van de

waterloop, ook maatregelen moeten worden genomen die samenhangen met het grondwatersysteem om een verhoging van de basisafvoer en een gedempte afvoerdynamiek te bereiken. Belangrijk daarbij is dat maatregelen genomen worden op de schaal van het grondwatersysteem, dat wil zeggen het in het volledige (deel)stroomgebied. Maatregelen in een klein deel van het gebied of alleen in of langs de beek, kunnen lokaal een gunstig effect hebben op de milieuomstandigheden, maar vaak is dat veel minder of niet het geval ten opzichte van grootschalige maatregelen.

Om succesvolle maatregelen te kunnen selecteren die bijdragen aan het bereiken van een verhoging van de basisafvoer en een gedempte afvoerdynamiek en staan de volgende uitgangspunten centraal (Verdonschot et al. 2012):

- Een integrale, ecologische systeembenadering op stroomgebiedsniveau.
- Het verbinden van de beek met het beekdal en het infiltratiegebied.
- Het in balans brengen van hydrologische en morfologische processen.
- Het verminderen van de afvoerdynamiek en het waarborgen van continue stroming.
- Het begeleiden van de uitvoering van maatregelpakketten voor, tijdens en na de uitvoering met adaptieve monitoring.

Maatregelen die alleen in de loop zelf worden genomen zijn in geen geval voldoende (Poelman et al. 2008).



Figuur 1: Brongerichte maatregelen in het stroomgebied om de water vast te houden: 1: bevorderen infiltratie in ondergrond, 2: omvormen naaldbos naar loofbos, 3: aanleggen doorstroommoerassen, 4: aanleggen beekbegeleidende moerassen, 5: verminderen onttrekkingen, 6: vertragen afstroming door verminderen drainerende greppels, sloten, drainage, 7: aanbrengen van hydrologische bufferzones met oeverwalleltjes, 8: verminderen versnelde afvoer door niet maaien of dood hout inbrengen, 9: verminderen van verhard oppervlak, 10: terugwinnen van RWZI/industriële effluent water.

De ecologische stroomgebiedsbenadering staat aan de basis van het te vormen maatregelenpakket met als doelen: i). Het verbeteren van de infiltratie van regenwater en het beter benutten van de bergingscapaciteit van de bodem (verhogen van de grondwaterstand = water conserveren), ii). Het verbeteren van het langduriger vasthouden van water (water vasthouden en bergen), en iii). Het vertragen van de afvoer van water. Ieder project begint met het uitvoeren van een stroomgebiedsbrede ecologische systeemanalyse (SESA). Dit betekent het verzamelen van kennis van het stroomgebied en van een vergelijkbaar natuurlijk stroomgebied met beekdal en beek (de referentiesituatie), rekening houdend met de toekomstige situatie, het op sporen van de oorzaak van de knelpunten en het schetsen van de potentiële, zoveel mogelijk brongerichte, maatregelen. In de maatregelpakketten die nodig zijn om de doelen te bereiken zijn de belangrijkste individuele maatregelen:

- Het verminderen van drainerende structuren in (delen van) het infiltratiegebied (aanpak van het netwerk van watergangen).
- Het bergen van de (piek)afvoeren.
- Het vertragen van versnelde oppervlakkige afvoer door het verminderen van de hoeveelheid verhard oppervlak en dichtgeslagen bodems, het verruwen van het oppervlak en het aanpassen van het type vegetatie en de vegetatiepatronen in het landschap (bijv. oriëntatie).
- Het verminderen van wateronttrekkingen voor beregening, drinkwater en industrie gedurende de zomerperiode.

- Het verbinden van de beek met het beekdal en het infiltratiegebied.
- Het verlengen van de weglengte van de beek.
- Het verondiepen van het beekprofiel en het vertragen van de afvoer daarin door middel van het aanbrengen van obstakels (inbrengen dood hout).
- Het afstemmen van lozingen uit RWZI's op het gewenste afvoerregime.
- Het volgen van het proces tijdens en na de uitvoering van maatregelen met adaptieve monitoring.

Hierna worden de bovenstaande onderdelen van een maatregelenpakket per onderdeel nader uitgewerkt.

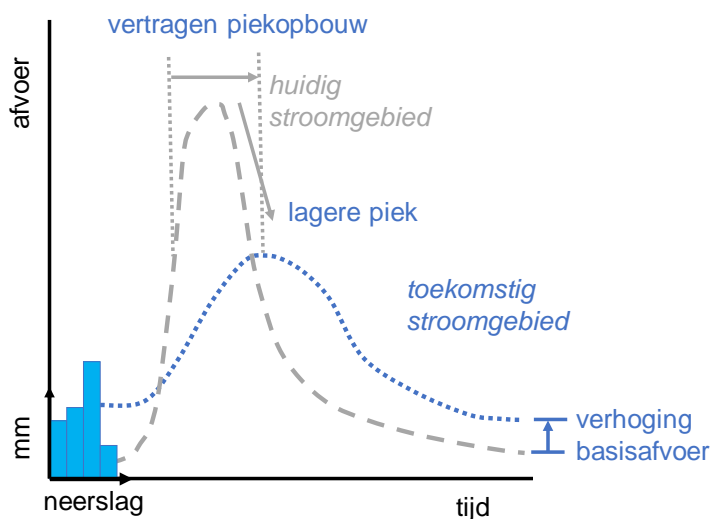
3.1 Het uitvoeren van een stroomgebiedsbrede ecologische systeemanalyse (SESA)

Bij het herstellen en verhogen van de gedempte basisafvoer moet het volledige stroomgebied worden beschouwd. Een systeemanalyse van een stroomgebied kan in beeld brengen welke aspecten in een specifiek gebied de grootste invloed hebben op de afvoerdynamiek. Daarbij is het zinvol aspecten die te maken hebben met het grondwatersysteem (bv. regionale geohydrologie, grondwateronttrekkingen) te onderzoeken en daarnaast aspecten als beekmorfologie, stuwing van waterlopen, vegetatie in waterlopen en landgebruiksaspecten (bv. verdamping van gewassen, erosiegevoelige beheer, (half-)verhard oppervlak, drainagedichtheid) mee te nemen. Op basis van een dergelijke systeemanalyse, eventueel aangevuld met een modelstudie, kan een strategie bepaald worden voor het nemen van effectieve maatregelen. In de meeste gevallen zal deze strategie een stroomgebiedsbrede aanpak vergen. Het vergroten van de infiltratiecapaciteit door het verminderen van de oppervlakkige en ondiepe drainagenetwerken staan hierbij centraal.

Een stroomgebiedsbrede ecologische systeemanalyse (SESA) van de processen in en het functioneren van een stroomgebied is een integrale benadering die begint met het begrenzen van het stroomgebied en het opstellen van interactieschema's. De vorm van landschap (geomorfologie), het beekdal en de beek (lengte en dwarsprofiel) vormen de ruimtelijke basis begrensd door de hydrologische eenheid. De analyse van de processen in en het functioneren van een stroomgebied wordt hanteerbaar gemaakt door per S uit het 5-S-Model (Verdonschot et al. 1998) aan deelanalyse uit te voeren en vervolgens de resultaten in de ecologische analyse te combineren om zo ook de samenhang en de daaruit voortkomende gevolgen in beeld te brengen. Het gaat er bij een integrale benadering om de componenten van het systeem (systeemvoorwaarden, hydrologie, beekmorfologie, waterkwaliteit en planten en dieren) in samenhang en naar de bestaande hiërarchieën te beschouwen. Het belangrijkste kenmerk van een interactieschema is de samenhang tussen componenten (5-S-en) en tussen landschapseenheid of deelstroomgebied, beekdal en beektraject in de tijd (schalen). De interacties worden in termen van processen en stromen van water en stoffen in de tijd en de ruimte beschreven.

De integrale ecologische systeemanalyse gebruikt zeven hoofdvragen om te komen tot een realistische aanpak (Verdonschot 2015):

- Wat zou hier zonder mens (op hoog schaalniveau) zijn? (m.a.w. een analyse van de systeemrandvoorwaarden en potentieel natuurlijke ecosystemen)
- Wat is hier? (m.a.w. een analyse van de actuele hydrologische, morfologische, chemische en biologische processen)
- Wat kan hier zijn? (m.a.w. een analyse van de gewenste biotische en abiotische, incl. de toekomstige ontwikkelingen in drukken/stressoren, processen om te komen tot realistische doelen)
- Wat knelt hier? (m.a.w. een analyse van de verschillen tussen vragen 2 en 3 in het licht van de richting die volgt uit vraag 1)
- Wat zijn de mogelijke oplossingen? (m.a.w. met welke ingrepen (maatregelen) kunnen welke sturende processen kunnen de benodigde sleutelfactoren op orde brengen)
- Wat is haalbaar? (m.a.w. welke van de beoogde ingrepen zijn haalbaar (realistisch) en leveren het gewenste effect op)
- Wat zijn de alternatieven? (m.a.w. itereer de vragen 5 en 6)



Figuur 2: De kerngedachte van het verhogen van de basisafvoer is het verlagen van de afvoerpieken om overstromingen te voorkomen en het verhogen van de lage afvoeren om stagnatie en droogval te voorkomen.

3.2 Het verminderen van drainerende structuren en het verbeteren van de infiltratie

Omdat het grootste deel van het regenwater niet bijdraagt aan de aanvulling van het grondwater maar door processen bovengronds en in de onverzadigde zone weer verdwijnt (grondwaterpeil, opname door planten, ondiepe afstroming, drainage) zijn vooral maatregelen die de aanvulling vergroten effectief. Om meer water in de bodem te kunnen bergen is het vergroten van de hoeveelheid water dat daadwerkelijk naar het grondwater infiltreert het belangrijkste. Dit betreft het verhogen van de stijghoogte van het grondwater op regionale schaal. De grondwaterstand moet overigens wel kunnen stijgen, m.a.w. diepe ontwateringen moeten ontbreken in het gebied waar maatregelen worden getroffen.

Mogelijke maatregelen om dit te bereiken zijn:

- Het dempen van drainerende sloten en greppels en het verwijderen van drainagemiddelen (drainage leidt tot 25-30% verminderde basisafvoer; Hendriks et al. 2014). Om toch een tijdelijke bergingscapaciteit te kunnen blijven handhaven kunnen sloten en greppels sterk worden verondiept en tegelijkertijd verbreed. Berging kan ook op andere wijze worden verkregen (zie verderop).
- Het verondiepen van diepe ontwateringen. Bij kleinere waterlopen en greppels heeft het verhogen van de drainagebasis en de drainageweerstand een verhogend effect op vooral de hoge grondwaterstanden. Bij een laag grondwaterpeil staan veel van deze kleinere waterlopen en greppels droog. Bij grotere waterlopen (die vooral de regionale drainagebasis bepalen) heeft het verhogen van de drainagebasis, door bijvoorbeeld het verondiepen van beken, tot gevolg dat enerzijds in infiltratiegebieden meer water infiltreert en minder water wordt afgevoerd, en anderzijds dat de (zomer)grondwaterstanden hoger worden. Het water dat in de intrekgebieden infiltreert stroomt via de ondergrond naar de lager gelegen beekdalen, waar het vervolgens als kwelwater wordt afgevangen door de aanwezige waterlopen.
- Het omvormen van naaldbossen naar loofbossen of korte vegetaties waarvan de verdamping kleiner is (heide, stuifzandvegetaties), waardoor er netto een grotere hoeveelheid neerslag aan de grondwatervoorraad wordt toegevoegd.
- Het verbeteren/herstellen van de bodemstructuur om meer water te laten infiltreren door het vergroten van de porositeit, oftewel het voorkomen van verdichting van de bodem door bijvoorbeeld:
 - Het gebruik van ander (lichter) materieel op landbouwpercelen.
 - Een betere timing van bewerkingen op het land.
 - Het minder diep bewerken en op een andere manier (d.w.z. geen kerende bewerking) bewerken van de percelen.
 - Een aangepaste gewaskeuze, met soorten die dieper wortelen, of minder intensief beregenen en bemesten, wat ook leidt tot diepere worteling bij veel gewassen.

- Het voorschrijven van de inzet van groenbemesters op bouwland.
- Initiëren bioturberend bodemleven.
- Het verhogen van de hoeveelheid organisch materiaal (bij bodems met een organisch stofgehalte <2-2.5%) draagt bij aan het (tijdelijk) vasthouden van water in de onverzadigde zone (Hanegraaf et al. 2009).
- Het verminderen van het verhard oppervlak draagt in belangrijke mate bij aan de infiltratie, vooral in stedelijke gebieden (Bolt et al. 2000).

Het verhogen van grondwaterstanden kan leiden tot hogere piekafvoeren als de dichtheid aan oppervlaktewaterlichamen en het areaal aan erosief terrein en verhard oppervlak niet wordt teruggebracht en voldoende berging wordt gecreëerd. Daarom moeten bovenstaande maatregelen altijd in combinatie worden genomen.

3.3 Het bergen van een (piek)afvoer

Het verhogen van grondwaterstanden leidt in natte perioden tot hogere piekafvoeren als de drainagedichtheid, de dichtheid aan watergangen (verminderen van de intensiteit van het bekennetwerk) en het areaal aan erosief terrein en verhard oppervlak niet worden teruggebracht. In alle delen van het watersysteem (onder- en bovengronds) moet daarom de bergingscapaciteit worden vergroot, zodat hevige neerslag kan worden opgevangen in, bij voorkeur, bovenstroomse delen van het stroomgebied, waardoor een groter deel van het water infiltreert naar het diepe grondwater of vertraagd de berging verlaat. Hierdoor kunnen piekafvoeren afnemen, wordt de basisafvoer verhoogd en het grondwater aangevuld. Piekafvoeren kunnen verder verlaagd worden door het nemen van maatregelen met betrekking tot de morfologie en vegetatie in de waterlopen. Om de jaarlijkse hoeveelheid beschikbaar water gelijkmatiger te doseren in de watergangen, is het van belang om verschillende maatregelen op een slimme manier te combineren. Mogelijke maatregelen om water te bergen zijn:

- Het aanleggen van diffuse afvoersystemen

Veel van onze huidige beken en watergangen liggen op plekken waar van nature geen (kronkelende) beken kunnen voorkomen, omdat het verhang en de stroomsnelheid te gering zijn om te leiden tot de daarvoor benodigde erosie en sedimentatie. In plaats daarvan kwamen meer diffuse afvoersystemen voor, waar afvoer voor een groot gedeelte van het jaar oppervlakkig plaatsvond door moerassige laagtes waarin niet altijd een duidelijke stroomgeul was te herkennen. De bergingscapaciteit en het vertraagd afgeven van water maakt dergelijke diffuse systemen tot uitstekende waterbergingsystemen. Naast de voeding met opkwellend grondwater kunnen diffuse afvoersystemen in laagtes veel regenwater voor lange tijd bergen en vertraagd afgeven.

- Het aanleggen van beekbegeleidende moerassen.

Beekbegeleidende moerassen begeleiden beken in de lage delen in het beekdal. Bij een hoge afvoer inundeert de beek het beekbegeleidende moeras. Dit water stroomt langzaam mee met de beek en wordt zeer geleidelijk aan de beek teruggegeven. Oeverwallepjes op de beekoevers kunnen deze terugvloeiing verder vertragen.

- Het aanleggen van waterbergingen/retentievaktes

Waterbergingen zijn gebieden die inunderen bij hoog water. Het verschil met beekbegeleidende moerassen is dat ze van nature niet voorkwamen en meestal omgeven zijn door een kade. Vaak liggen ze ook niet op de laagste delen in een dal maar op praktisch geschikte plekken. Een bijzondere vorm is het extra bergen van water op bestaand water in een watergang of plas.

3.4 Het vertragen van (versnelde) oppervlakkige afvoer

Bij het vertragen van (versnelde) oppervlakkige afvoer wordt het regenwater dat de grond bereikt zoveel mogelijk geïnfiltreerd en er wordt tegelijkertijd voor gezorgd dat het zo min mogelijk afspoelt. De versterking van de infiltratie is hiervoor besproken. Het voorkomen van versnelde boven- en ondergrondse afvoer naar de beek kan op verschillende wijzen worden bereikt:

- Op het veld door dwars op de hellingsrichting te ploegen en het egaliseren van eventueel aanwezige ondiepe greppels om directe afspoeling te voorkomen.
- Door het dichten van greppels en verwijderen van drainagemiddelen, zodat een groter deel van het water afgevoerd wordt naar de ondergrond.
- Door de aanleg van (hydrologische) buffers tussen het perceel en de watergang, zoals bosstroken en walletjes.

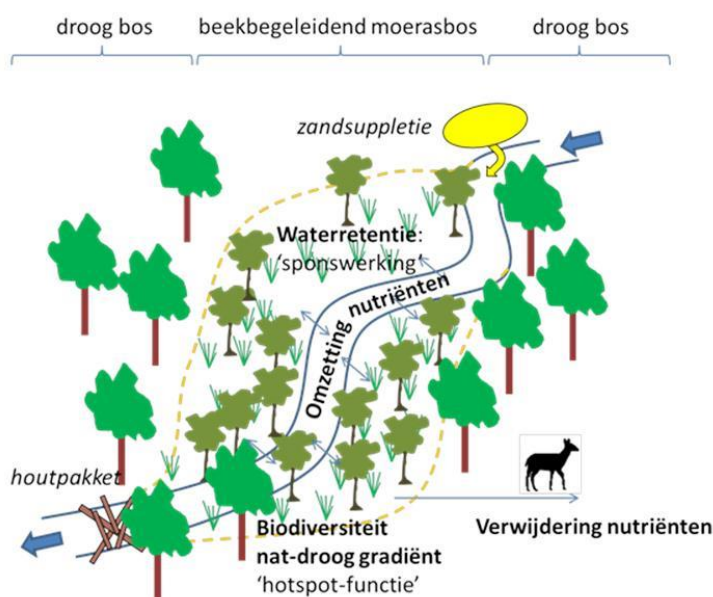
- Het zo bewerken van de bodem dat er geen regenwaterplassen en oppervlakkig afwaterende geultjes ontstaan, waardoor het water niet versneld afspoelt. Het zaaien van bijvoorbeeld wintertarwe kan hier ook aan bijdragen.

3.5 Het verminderen van wateronttrekkingen

De winning van grondwater door drinkwaterbedrijven en industrieën en beregening in de landbouw is in veel gebieden één van de belangrijkste veroorzakers van grondwaterpeildalingen. Het stoppen van deze winningen, in combinatie met maatregelen zoals het verwijderen van drainage, het stoppen van irrigatie in de buurt van de hoofdwaterloop, het verhogen van de oppervlaktewaterpeilen, het verwijderen van stuwen en de omzetting van naaldbos in loofbos of korte vegetaties levert een sterke stijging van het grondwaterpeil op. Hergebruik van industrieel proceswater, maar ook in de drinkwaterwinning via bijvoorbeeld waterbesparende maatregelen door huishoudens, kan de hoeveelheid onttrokken water reduceren.

3.6 Het verbinden van de beek met het beekdal en het infiltratiegebied

Het verbinden van de beek met het beekdal en het infiltratiegebied is niet alleen ecologisch uiterst belangrijk maar het biedt ook ruimte voor inundatie. Tijdelijke of langdurige inundatie van delen van beekdalen, zoals beekbegeleidende moerassen, draagt bij aan het vasthouden en bergen van water. Voordeel van een goed ontwikkeld beekbegeleidend bos is, naast de hoge biodiversiteitswaarde, dat deze zones optreden als een 'spons'; water wordt langer vastgehouden, waardoor het bos kan worden ingezet als buffer van afvoerpieken en voor waterconservering in perioden van droogte. Verder heeft het beekbegeleidend bos een open bladerdak, waardoor meer licht de beek kan bereiken dan bij beschaduwing door bijvoorbeeld beuk of eik. Ook ontstaan open plekken op de natste locaties, omdat bomen hier niet stand kunnen houden. Dit leidt tot plaatselijke waterplantenontwikkeling in de beek, wat weer positief doorwerkt op de vernauwing van de loop en remming van de afvoer. Ook leiden vegetaties tot het eerder optreden van inundaties, waardoor de functie van het beekbegeleidende moeras versterkt wordt.



Figuur 3: Schematisch overzicht van de functies en ecosystemendiensten van met de beek verbonden laagtes.

3.7 Het verlengen van de weglengte van de beek

Het lengteprofiel van een beek hangt af van het type sediment, de breedte en diepte en het bodemverhang. Actieve meandering is in Nederlandse laaglandbeken met een verhang <math>< 1 \text{ m/km}</math> slechts een tijdelijk verschijnsel, dat alleen optreedt in de initiële fase na een herstelproject waarbij een onbegroeide oever is gecreëerd (Eekhout et al. 2012). Nadat vegetatie de oever heeft vastgelegd stopt de oevererosie en verplaatst dit proces zich naar de bodem totdat een evenwicht is bereikt tussen vaste punten in het bodemlengteprofiel. Oevererosie en daarmee passieve meandering blijkt alleen op te treden als gevolg van

externe factoren, zoals een kwelrijke oever, een omgevallen boom of andere door externe processen ontstane oeverzwakte (Eekhout 2014).

Het actief verlengen van de weglengte van de beek leidt tot veranderingen in het landschap, de waterhuishouding en de beekdalecologie. Door wegverlenging wordt het verhang van de waterlijn kleiner maar het verval blijft even groot. Ook blijft de ontwateringsdiepte t.o.v. de omgeving min of meer gelijk, maar het is de vraag of dat voor het hele beektraject geldt en of er verschillen optreden op de drainerende werking van de omgeving. Door de wegverlenging zal de beek bij een hoge afvoer overstromen, en omdat er dan water op het maaiveld geborgen wordt, wordt de afvoerpiek kleiner. In ieder geval verandert het beekpeil, waardoor de grondwaterstanden langs de verlengde beek hoger worden. Het beekpeil wordt ook hoger door de grotere stromingsweerstand of vernauwingen in het profiel, de verhoogde drainageweerstand en omdat de afwaterende oppervlakten in binnen- en buitenbochten van elkaar gaan verschillen. Na inundatie van de oevers is de terugstroming van het geborgen water kleiner dan de geïnundeerde hoeveelheid. Deze hoeveelheid berging (en inzijing) kan worden vergroot door kleine oeverwallen langs de beek aan te leggen (of worden verkleind door de laagtes middels greppel op het afwateringssysteem aan te sluiten).

De weglengte van een beek bepaalt tevens het bodemverhang. Een langere weglengte, m.a.w. een meer kronkelende beek, heeft een kleiner bodemverhang. Een kleiner bodemverhang leidt tot een lagere gemiddelde stroomsnelheid. Dit betekent dat de mate van kronkelen moet worden afgestemd op de toekomstig te verwachten neerslag en landgebruik.

Samenvattend betekent dat het verlengen van de weglengte van een beek:

- Afgestemd moet zijn op de toekomstige hydrologische situatie.
- Actief inrichten vraagt.
- Eventueel samen met de aanleg van oeverwallekens moet worden uitgevoerd.

3.8 Het verondiepen van het beekprofiel en het vertragen van de afvoer door obstakels

Het verhogen van het waterniveau in grote watergangen en het verondiepen van kleinere waterlopen is effectief bij droogtebestrijding (Querner & van Lanen 2001). Een effectieve mogelijkheid om een verhoging van het beekpeil te realiseren omvat het (lokaal) vernauwen van het beekprofiel (Chambers et al. 1992, Sand-Jensen 1998). Vernauwingen kunnen ontstaan door actieve beekboderverhoging (bijvoorbeeld zandsuppletie), sedimentatie, of obstakels die zich vormen of bewust worden aangebracht. De combinatie van het inbrengen van dood hout en het suppleren van zand kan al op korte termijn leiden tot aanzienlijke beekboderverhoging zonder dat dit ingrijpende ecologische gevolgen heeft (dos Reis Oliveira et al. 2019). De zandsuppletie-experimenten in de Hierdense beek hebben laten zien dat gedoseerd suppleren, in beektrajecten waar vooraf dood houtpakketten zijn aangebracht, in eerste instantie leidt tot een achteruitgang van de beekgemeenschap doordat geschikt habitat onder het zand verdwijnt, maar dat soorten binnen circa 3 maanden terugkeren naar de locatie. Daarna is juist een verrijking van de gemeenschap waargenomen, met name van stromingsminnende soorten, die profiteren van de hogere stroomsnelheden als gevolg van de profielverkleining door de suppletie. De lange-termijn-effecten zijn nog niet bekend, maar worden momenteel (anno 2020) onderzocht. Deze wijze van zand suppleren heeft aantoonbaar geleid tot in eerste instantie het verhogen van de beekbodem en in tweede instantie tot een 'natuurlijke' versmalling van de bedding door oevererosie mogelijk door externe factoren geïnitieerd. Hydrologische waarnemingen en modelberekeningen hebben inmiddels laten zien dat >60% van het water niet meer het benedenstroomse punt bereikt maar inzigt en daarmee het grondwater aanvult. De verwachting is dat het grondwater geleidelijk wordt aangevuld en dat daardoor de mate van inzijing enigszins afneemt. Hiervoor zijn inmiddels de eerste aanwijzingen, de watervoerendheid tijdens droge perioden lijkt te zijn verbeterd, wat indiceert dat de drainagebasis verhoogd is door de maatregelen. Waterplanten blijken zich door de verondieping sterk te hebben uitgebreid, vooral in trajecten waar moerasvorming in het beekdal optreedt.

Het vernauwen van het beekprofiel kan er ook toe leiden, vooral in natte perioden met een forse afvoer, dat het peil kan worden opgestuwd. Dit is vergelijkbaar met de opstuwning door een barrière, waar voor een obstakel het peil ook hoger is met ter plekke een stroomsnelheid die lager is dan gemiddeld. Ook na de versmalde doorgang is de waterstand nog hoger, maar daar neemt de stroomsnelheid (sterk) toe tot de eigenlijke verhanglijn waar de stroming weer 'normaal' is.

Ook vegetatie in watergangen kan werken als obstakel en verandert de totale ruwheid van de bedding door het seizoen heen. De ruwheid die vegetatie teweegbrengt is afhankelijk van de stevigheid van de plant en de biomassa per oppervlakte-eenheid. Een veelgebruikte manier om de ruwheid van planten, en daarmee hun effect op doorstroming, te berekenen is het kwantificeren van de hoeveelheid takken/stengels

per m², de diameter van deze stengels en de hoogte ervan, in relatie tot hun stevigheid en de waterdiepte (Baptist et al. 2007, van Velzen et al. 2003). Er moet dan ook onderscheid gemaakt worden tussen meerjarige, vaak hoog opgaande, stevige oevervegetatie die ook in de winter aanwezig is (zoals riet, lisdodde en liesgras) en jaarlijks terugkerende, veelal minder stevige, ondergedoken en drijvende soorten die vooral in het open deel van de beek worden gevonden (o.a. hoornblad, fonteinkruiden, gele plomp, sterrenkroos, kleine egelskop etc.).

De effecten van vegetatie op waterhoogte kunnen zowel in positief opzicht als in negatief opzicht worden beschouwd: tijdens droge periodes zal vegetatie in de beek ervoor zorgen dat water langer wordt vastgehouden, en tijdens natte periodes kan diezelfde vegetatie zorgen voor een verminderde afvoer capaciteit, wat risico's op lokale overstromingen met zich mee brengt. Hierin moet dus een afweging worden gemaakt tussen de voordelen tijdens periodes met droogte en de mogelijke nadelen tijdens natte periodes (Keizer-Vlek & Verdonschot 2015).

3.9 Het afstemmen van lozingen uit RWZI's op gewenst afvoerregime

Lozingen van effluent van RWZI's kunnen een aanzienlijke bijdrage leveren aan de totale afvoer van beken. Sommige beken zijn in de zomer voor 100% afhankelijk van effluent. Echter omdat de kwaliteit van het effluent nog onvoldoende is om een goede ecologische kwaliteit te bereiken, is direct gebruik van effluent als waterbron om een beek af te raden. Effluent heeft voor de beek zelf hetzelfde effect als organische belasting. Effluent kan wel gebruikt worden als irrigatiewater als het voldoende schoon is en zonder toxische stoffen, met als bij komend voordeel additionele bemesting en de mogelijkheid tot infiltratie. Ook kan het effluent verder worden gezuiverd, het water teruggewonnen, om vervolgens de watervoorraad aan te vullen of hergebruik te bevorderen.

4 Samenvatting

Om de basisafvoer te verhogen dienen stroomgebieden weer hydrologisch te gaan functioneren op een manier die passend is bij de systeemvoorwaarden (klimaat, geologie, geohydrologie, -morfologie, -chemie) ter plekke.

Hiervoor zijn brongerichte maatregelen in het stroomgebied om water te conserveren, vast te houden, te bergen en vertraagd af te voeren noodzakelijk. Lokale maatregelen zijn hiertoe altijd onvoldoende.

Maatregelen die de basis van het regionale grondwatersysteem verhogen zijn het bevorderen infiltratie in ondergrond, het omvormen naaldbos naar loofbos, het aanleggen doorstroommoerassen, het aanleggen beekbegeleidende moerassen, het verminderen van onttrekkingen, het vertragen van de afstroming door verminderen drainerende greppels, sloten, drainage, het aanbrengen van hydrologische bufferzone met oeverwallepjes, het verminderen versnelde afvoer door het niet maaien of dood hout inbrengen, het verminderen van verhard oppervlak en het terugwinnen van RWZI/industriële effluent water.

5 Literatuur

- Baatrup-Pedersen A, Hoffmann CC, Andersen HE, Riis T, Larsen SE, Audet J, Kronvang B. 2013. Groundwater nitrogen and the distribution of groundwater-dependent vegetation in riparian areas in agricultural catchments. Submitted to Ecological Engineering.
- Banach K, Banach AM, Lamers LPM, De Kroon H, Bennicelli RP, Smits AJM, Visser EJW. 2009. Differences in flooding tolerance between species from two wetland habitats with contrasting hydrology: implications for vegetation development in future floodwater retention areas. *Annals of Botany* 103: 341-351.
- Baptist, M. J., Babovic, V., Rodríguez Uthurburu, J., Keijzer, M., Uittenbogaard, R. E., Mynett, A., & Verwey, A. (2007). On inducing equations for vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 435-450.
- Barko J.W. & R.M. Smart, 1986. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submerged macrophytes. *Ecology* 67: 1328-1340.
- Bilby R.E. & G.E. Likens, 1980. Importance of organic debris dams in the structure and function of stream ecosystems. *Ecology* 61(5): 1107-1113.

- Bolt FJE van der, Veldhuizen AA & van Bakel PJT (2000) Verhogen van de basisafvoer van de Drentsche Aa; verkennen van mogelijke maatregelen. Alerra Research Instituut voor de Groene Ruimte. Wageningen.
- Brauer, C. C., Teuling, A. J., Overeem, A., Van Der Velde, Y., Hazenberg, P., Warmerdam, P., & Uijlenhoet, R. (2011). Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(6), 1991-2005.
- Carpenter S.R., S.G. Fisher, N.B. Grimm & J.F. Kitchell, 1992. Global change and freshwater ecosystems. *Annual review of ecology, evolution and systematics* 23: 199-139.
- Chambers PA, Prepas EE & Gibson K (1992) Temporal and spatial dynamics in riverbed chemistry: the influence of flow and sediment composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 10: 2128-2140.
- dos Reis Oliveira, P. C., Kraak, M. H., Verdonschot, P. F., & Verdonschot, R. C. (2019). Lowland stream restoration by sand addition: Impact, recovery, and beneficial effects on benthic invertebrates. *River Research and Applications*, 35(7), 1023-1033.
- Evans, D. J., & Johnes, P. J. (2004). Physico-chemical controls on phosphorus cycling in two lowland streams. Part 1—the water column. *Science of the Total Environment*, 329(1-3), 145-163.
- Garssen, A. G., Baattrup-Pedersen, A., Riis, T., Raven, B. M., Hoffman, C. C., Verhoeven, J. T., & Soons, M. B. (2017). Effects of increased flooding on riparian vegetation: Field experiments simulating climate change along five European lowland streams. *Global change biology*, 23(8), 3052-3063.
- Garssen, A. G., Verhoeven, J. T., & Soons, M. B. (2014). Effects of climate-induced increases in summer drought on riparian plant species: A meta-analysis. *Freshwater Biology*, 59(5), 1052-1063.
- Hanegraaf, M. C., Hoffland, E., Kuikman, P. J., & Brussaard, L. (2009). Trends in soil organic matter contents in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 60(2), 213-222.
- Hendriks, D. M. D., Kuijper, M. J. M., & Van Ek, R. (2014). Groundwater impact on environmental flow needs of streams in sandy catchments in the Netherlands. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3-4), 562-577.
- Higler, L. W. G. (1993). The riparian community of north-west European lowland streams. *Freshwater Biology*, 29(2), 229-241.
- Jones Jr, J. B., & Smock, L. A. (1991). Transport and retention of particulate organic matter in two low-gradient headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 10(2), 115-126.
- Keizer-Vlek, H. E., & Verdonschot, P. F. M. (2015). Verkenning van de mogelijkheid om waterplanten in te zetten als natuurlijke stuwen. Alterra, Wageningen-UR.
- Lake, P. S. (2003). Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters. *Freshwater biology*, 48(7), 1161-1172.
- Lamers L.P.M., Loeb R., Antheunisse A.M., Miletto M., Lucassen E.C.H.E.T., Boxman A.W. et al. (2006) Biochemical constraints on the ecological rehabilitation of wetland vegetation in river floodplains. *Hydrobiologia*, 565, 165-186.
- Lytle, D. A. (2008). Life-history and behavioural adaptations to flow regime in aquatic insects. *Aquatic insects: challenges to populations*. CAB International. Trowbridge, 122-138.
- Lytle, D. A., & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in ecology & evolution*, 19(2), 94-100.
- Madsen J.D., P.A. Chambers, W.F. James, E.W. Koch & D.F. Westlake, 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia* 444: 71-84.
- Matheswaran, K., Blemmer, M., Thorn, P., Rosbjerg, D., & Boegh, E. (2015). Investigation of Stream Temperature Response to Non-Uniform Groundwater Discharge in a Danish Lowland Stream. *River research and applications*, 31(8), 975-992.
- McCabe, D.J., Gotelli, N.J. 2000. Effects of disturbance frequency, intensity, and area on assemblages of stream macroinvertebrates. *Oecologia*, 124: 270-279.
- Newbold, J. D., Elwood, J. W., O'Neill, R. V., & Winkle, W. V. (1981). Measuring nutrient spiralling in streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(7), 860-863.
- O'Connor, N. A., & Lake, P. S. (1994). Long-term and seasonal large-scale disturbances of a small lowland stream. *Marine and Freshwater Research*, 45(2), 243-255.
- Olde Venterink, H. G. M. (2000). Nitrogen, phosphorus and potassium flows controlling plant productivity and species richness: eutrophication and nature management in fens and meadows. Thesis University Utrecht.
- Palmer M.A., A.P. Covich, S. Lake, P. Biro, J.J. Brooks, J.Cole, C. Dahm, J. Gibert, W. Goedkoop, K. Martens, J. Verhoeven & W.J. van de Bund, 2000. Linkages between aquatic sediment biota and life above

- sediments as potential drivers of biodiversity and ecological processes. *BioScience* 50(12): 1062-1075.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Querner, E. P., & van Lanen, H. A. (2001). Impact assessment of drought mitigation measures in two adjacent Dutch basins using simulation modelling. *Journal of hydrology*, 252(1-4), 51-64.
- Rajwa-Kuligiewicz, A., Bialik, R. J., & Rowiński, P. M. (2015). Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(4), 353-363.
- Sand-Jensen K (1998) Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams. *Freshwater Biology* 39: 663-679.
- Smock L.A., G.M. Metzler & J.E. Gladden, 1989. Role of debris dams in the structure and functioning of low-gradient headwater streams. *Ecology* 70(3): 764-775.
- Velzen, E. V., Jesse, P., Cornelissen, P., & Coops, H. (2003). Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden. RIZA, Arnhem.
- Verdonschot, P. F., & van den Hoorn, M. (2010). Using discharge dynamics characteristics to predict the effects of climate change on macroinvertebrates in lowland streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(4), 1491-1509.
- Verdonschot, P. F., Runhaar, H., Hendriks, D., & Verdonschot, R. C. (2017). Integraal natuurherstel in beekdalen: Ontwikkeling van diffuse afvoersystemen, gedempte afvoerdynamiek en beekprofielherstel (No. 2017/215-BE). VBNE, Vereniging van Bos-en Natuurterreineigenaren.
- Verdonschot, R. C., van Oosten-Siedlecka, A. M., ter Braak, C. J., & Verdonschot, P. F. (2015). Macroinvertebrate survival during cessation of flow and streambed drying in a lowland stream. *Freshwater Biology*, 60(2), 282-296.
- Verdonschot R.C.M. & Verdonschot P.F.M. (2020). Factsheet: Droogte. Kennisimpuls Waterkwaliteit. Notitie KIWK, Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen. 10 pp.
- Westveer, J. J., Verdonschot, P. F., & Verdonschot, R. C. (2017). Substrate homogenization affects survival and fitness in the lowland stream caddisflies *Micropterna sequax* and *Potamophylax rotundipennis*: a mesocosm experiment. *Freshwater Science*, 36(3), 585-594.
- Wood, P. J., & Armitage, P. D. (1999). Sediment deposition in a small lowland stream—management implications. *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 15(1-3), 199-210.