

FACTSHEET KIWK

Stroming en waterbeweging



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

Peter van Puijenbroek (PBL), Marjoke Mulder (RWS), Tom Buijse (Deltares), Ellis Penning (Deltares), Marielle van Riel (WEnR)

Wijze van citeren

Verdonschot P.F.M. & Verdonschot R.C.M. (2020). Factsheet: Stroming en waterbeweging. Kennisimpuls Waterkwaliteit. Notitie Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK), Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen. 13 pp.

Trefwoorden

Afvoerfrequentie, Afvoerduur, Afvoertiming, Brongerichte maatregel, Grootschalig, Retentie, Infiltratie, Vertraagd afvoeren, Ecologische systeemanalyse

Beeldmateriaal

Piet Verdonschot

DOI: <https://doi.org/10.18174/534359>

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 Waterbewegings- en stromingsprocessen	2
2.2 Effecten op andere sleutelfactoren in het waterecosysteem	3
2.3 Ecologische responsen	4
3 Maatregelen	5
3.1 Beken en riviertjes	5
3.2 Sloten en kanalen	6
3.3 Plassen en meren	7
3.4 Vergroten van de ecologische systeemkwaliteit	8
3.5 Versterken van dispersieroutes en bronpopulaties.	9
4 Conclusies	9
5 Literatuur	9

1 Inleiding

Menselijk activiteiten zoals veranderd landgebruik, het verlagen van de grondwaterpeilen, het omkeren van de oppervlaktewaterpeilen, het verstuwen van stromende wateren, het toevoeren van of doorspoelen met gebiedsvreemd water en het versneld afvoeren van water hebben de natuurlijke waterhuishouding overal sterk veranderd (Poff et al., 1997). Ook klimaatverandering met steeds nattere winters, drogere zomers en intensievere regenbuien in de zomer draagt bij aan een grotere dynamiek in de natuurlijke waterhuishouding. Stromende en stilstaande wateren wijken hydrologisch gezien steeds verder af van de oorspronkelijke toestand en worden hierdoor steeds verder verstoord (Lake, 2000). De laatste 50 jaar zijn de van nature stromende wateren in Nederland steeds meer op stilstaande wateren gaan lijken.

Om de ecologische effecten van verstoorde waterbeweging te bepalen moet onderscheid worden gemaakt tussen waterbeweging in stilstaande wateren en stroming in stromende wateren. Verstoring is de afwijking ten opzichte van de natuurlijke waterbeweging/stroming in ruimte en tijd. De mate van verandering is te kwantificeren aan de hand van de omvang, frequentie, duur, timing en voorspelbaarheid (Wright et al., 1994; Lytle & Poff, 2004), wat weer doorwerkt op het ecosysteem, oftewel de soorten die er voorkomen en de processen die zich er afspelen. Voorbeelden zijn stagnatie en extreme piekafvoeren in laaglandbeken, doorvoer van inlaat water in stilstaande sloten of handhaven van een omgekeerd peil in bijvoorbeeld meren. Zo bepaald de duur van stagnatie in beken in de zomer (timing) in belangrijke mate de overlevingskansen van stromingsminnende soorten. Extreem hoge (omvang) piekafvoeren leiden tot erosie en wegspoelen van individuen. Een hoogfrequente doorvoer van water door sloten leidt tot slibverplaatsing en habitatverandering. Zomerstagnatie en extreme piekafvoeren zijn pulsgewijze verstoringen van het beekstelsel, verstuwung daarentegen is veel meer een continue verstoring (druk of 'press').

2 Effecten

2.1 Waterbewegings- en stromingsprocessen

Stroming omvat de waterbeweging in stilstaande wateren, de stroming van grondwater naar oppervlaktewaterlichamen en de naar benedenstrooms gerichte stroming van oppervlaktewater in stromende wateren.

Waterbeweging in stilstaande wateren, vaak ook aangeduid als turbulentie, wordt veroorzaakt door hydraulische bewegingen (aan- en afvoer van water door bijvoorbeeld pompen van gemalen, scheepschroeven en boeggolven schepen), dichtheidsgradiënten (bijv. temperatuur gedreven waterbewegingen in meren) en windwerking. De laatste is de belangrijkste factor in wateren met een grote strijklengte (Bengtsson, 1978). Wind stuwt water aan het oppervlak op waardoor langs de bodem een tegengestelde waterstroom ontstaat. Bij sterke wind treedt scheefstand op waarbij aan de ene zijde van een meer de litorale zones droogvallen en aan de andere zijde juist oevers inunderen. Door windwerking ontstaat ook golfslag, die eroderend op de litorale zone en de oevers kan inwerken. Dagelijkse verschillen in waterbeweging en turbulentie hebben een direct effect op de groei en de seizoenssuccessie van algen (Reynolds, 1984; Peeters et al., 2007) en de opwerveling van fijn sediment en het vrijkomen van nutriënten (Kristensen et al., 1992; Søndergaard et al., 1992). Dergelijke waterbeweging kan ook door scheepvaart worden veroorzaakt (Anthony & Downing, 2003).

De aan- en afvoer van water heeft grote invloed op de verblijftijd (Wetzel, 1990) en bepaalt de nutriëntenvrucht en -cyclus en daarmee ook de ontwikkeling van de algengemeenschappen (Kronvang et al., 2005; Elliott & Defew, 2011). In sloten kan de aan- en afvoer dicht bij gemalen leiden tot omstandigheden die lijken op stromende wateren, met name wanneer er intensief gepompt wordt.

In stromende wateren (beken en rivieren) treedt stroming in één richting op — van bovenstrooms naar benedenstrooms — door de afvoer van grond- en regenwater als onderdeel van de hydrologische cyclus. De omvang en andere eigenschappen van deze afvoer worden bepaald door factoren als klimaat, vegetatie, topografie, geologie, landgebruik en bodemkenmerken (Allan, 1995). De stroomsnelheden die door de afvoer worden gegenereerd zijn afhankelijk van het verhang, de sinuositeit, het dwarsprofiel, de waterdiepte, de bodemruwheid en de in de bedding aanwezige structuren (Gordon et al., 2004). Naast deze stroming in de lengterichting van de beek of rivier treedt ook in zijwaartse richting (lateraal) stroming op, bijvoorbeeld wanneer tijdens een toename van de afvoer een beek of rivier buiten haar oevers treedt

en het beekdal of de uiterwaarden inundeert. Analyses van de levensgemeenschappen in Nederlandse laaglandbeken laten zien dat de ecologie vooral samenhangt met het verloop van de afvoer in de tijd, de mate van verslibbing, de beekbreedte en de trajectmorfologie (Verdonschot, 2009). Verstuwde beeksystemen hebben door het ontbreken van voldoende stroming hun beekkenmerken zoals variatie in substraten, gezonde zuurstofhuishouding en helder water verloren en vertonen meer gelijkenis met slootecosystemen.

2.2 Effecten op andere sleutelfactoren in het waterecosysteem

Waterbeweging en stroming hebben direct en indirect invloed op verschillende sleutelfactoren:

1. **Substraten.** Erosie, transport en sedimentatieprocessen worden gestuurd door waterbeweging. In vennen, plassen en meren resulteert windwerking in golfslag en waterbeweging wat weer leidt tot erosie van geëxponeerde oevers, transport van fijn organisch en mineraal materiaal en sedimentatie van dat materiaal in luwten. In stromende wateren treden dezelfde processen op met de afvoer als sturende factor. In stromende wateren worden hout, blad, grof en fijn organisch en mineraal materiaal losgeslagen, getransporteerd en afgezet wat leidt tot complexe substraatmozaïeken op de bedding.
2. **Zuurstof.** Door waterbeweging en stroming wordt de diffusie van zuurstof in de atmosfeer naar het water vergroot. Op turbulente plekken, zoals stroomversnellingen in beken en golfslagzones van meren treedt zoveel diffusie van zuurstof op dat het water hier bijna altijd zuurstofverzadigd is. In langzaam stromende en stilstaande wateren is de diffusie vele malen lager en kan door afbraak van organisch materiaal het zuurstofverbruik groter zijn dan de diffusie vanuit de lucht en de productie door planten en algen. In dergelijke wateren treedt een duidelijk en versterkt dag-nacht ritme in het zuurstofgehalte op (Edwards & Owens, 1962; van der Lee et al., 2018).
3. **Licht.** Planten hebben licht nodig voor de fotosynthese (primaire productie). Waterbeweging en stroming kunnen leiden tot opwerveling van fijn sediment, waardoor het water troebel(er) wordt en er minder licht doordringt, vergelijkbaar met het effect van beschaduwing (Hill et al., 1995). Hierdoor zullen algen en macrofyten minder goed groeien.
4. **Temperatuur.** De toevoer van grondwater naar stilstaande en stromende wateren, het verschil met de luchttemperatuur en de snelheid waarmee het water wordt afgevoerd bepalen mede de temperatuur van het oppervlaktewater (Hayashi & Rosenberry, 2002; 2002). Zo nemen bronnen en bovenloopjes bij hoge grondwatertoevoer bijna de temperatuur van het grondwater aan. Ook kwelontvangende bodems in sloten kunnen afhankelijk van het jaargetijde warmer of koeler zijn door het aangevoerde grondwater. Deze buffering in temperatuurvariatie heeft effect op de soorten die op deze plekken voorkomen, bijvoorbeeld op hun groei- en ontwikkelingsnelheid. Ook zijn er soorten die alleen in relatief koud water voorkomen (koud-stenotherm).
5. **Stoffen.** Bij stoffen moet onderscheid worden gemaakt tussen de concentratie (hoeveelheid per volume-eenheid water) en de vracht (concentratie per tijdseenheid). Het in- en uitlaten van water in stilstaande wateren heeft grote invloed op de nutriëntenhuishouding, de hoeveelheid organisch materiaal en fytoplanktonontwikkeling (Søballe & Kimmel, 1987). De vracht in het aanvoerwater t.o.v. de aanwezige vracht in het ontvangende water bepalen of sprake is van oplading of doorspoeling (in termen van nutriënten van eutrofiëring of oligotrofiëring). In stromende wateren heeft de afvoer grote invloed op de beschikbaarheid van stoffen. De relatie tussen opnamesnelheid van stoffen door organismen t.o.v. de vracht bepaalt de hoeveelheid die aan het water onttrokken wordt (Newbold et al., 1981). In eutrofe beken is de opname vele malen lager dan de vracht en zijn grote beeklengtes nodig om 'zelfreiniging' (feitelijk de tijdelijke opname en vastlegging in organismen) te realiseren (Gücker & Pusch, 2006).
6. **Connectiviteit.** De hydrologische connectiviteit verschilt sterk tussen de verschillende hoofdwatertypen. Stromende en lijnvormige stilstaande wateren zijn altijd gebaat bij verbinding waardoor uitwisseling van materiaal en organismen mogelijk is. Het onderbreken van connectiviteit door bijvoorbeeld stuwen heeft directe gevolgen voor de factor stroming zelf en voor alle uitwisselingsprocessen en -mogelijkheden. Stilstaande geïsoleerde wateren zijn juist gebaat bij de isolatie, zeker kleinere wateren zoals plasjes en vennen, waardoor ze intrinsiek kunnen functioneren en een eigen ontwikkeling kunnen doormaken. Het blijkt dat geïsoleerde laagveenwateren (petgaten) samen een hoger macrofaunadiversiteit hebben dan wanneer ze verbonden zouden zijn (Didderen, 2007). Ook in slotensystemen is de diversiteit tussen polders groter dan daarbinnen.

•

Omdat waterbeweging en stroming een dominante rol spelen in aquatische ecosystemen heeft verandering in deze factoren vaak tegelijkertijd effect op meerdere andere sleutelfactoren. Als bijvoorbeeld de waterbeweging in de golfslagzone of de stroming in beken stagneert hopen nutriënten en organisch materiaal zich op, vermindert de zuurstofbeschikbaarheid en verslibt het substraat waardoor de substraatvariatie verloren gaat (Speaker et al., 1984; Boulton, 2003). Bij extreem hoge stroming of sterke golfslag wordt organisch substraat (delen van waterplanten, blad, takken, fijn en grof organisch materiaal) afgevoerd of weggespoeld, komt veel bodemmateriaal in suspensie waardoor licht- en zuurstofregime negatief worden beïnvloed, erodeert het minerale materiaal en is er veel habitatverlies. In sloten leidt de afname van waterbeweging tot stratificatie en kan plaatselijk zuurstoftekort optreden, fijn organisch materiaal en slib bezinken en verslechteren de porositeit en zuurstofhuishouding van de bovenste bodemlaag.

2.3 Ecologische responsen

Soorten hebben verschillende aanpassingen om met waterbeweging en stroming om te gaan:

1. **Morfologisch.** Stroming oefent stress uit op organismen waarvoor het energie kost om te voorkomen dat ze wegspoelen. In beken en rivieren hebben soorten zich morfologisch aangepast aan stroming, ze hebben bijvoorbeeld een afgeplat lichaam, geringe afmetingen, aanhangsels om in de stromingsrichting te blijven, een huisje met steentjes die als ballast fungeren of het bezit van veel kleine haartjes of een zuignap (zoals de ronde beekmuts (een napjesslak) en de beekprik larve) om zich aan hard substraat te hechten (Hynes, 1970). Waterplanten hebben een stevig wortelstelsel wat ze beschermt tegen wegspoelen en gestroomlijnde flexibele bladeren (Bloemendaal & Roelofs, 1988). Ook in de golfslagzone komen dergelijke aanpassingen goed van pas. Sommige macroinvertebraten hebben aanpassingen om voedsel uit het stromende water te filteren (microben, algen en fijn organisch materiaal; Biggs et al., 1998). Ze gebruiken waaivormig aangepaste monddelen, spinseldraden of netten om deeltjes en organismen uit het water te filteren ('passieve filtreerders' zoals larven van kriebelmuggen of netspinnende kokerjuffers; Lancaster & Downes, 2010).
2. **Fysiologisch.** Sommige stromingsminnende faunasoorten hebben uitwendige structuren die dienen als kieuwen zodat meer zuurstof kan worden opgenomen. Ze vertrouwen op de natuurlijke constante zuurstoftoevoer (zoals nimfen van sommige eendagsvliegen) en zijn kwetsbaar wanneer de aanvoer vermindert omdat constante passage van zuurstofrijk water nodig is om voldoende diffusie op te wekken (Jaag & Ambuhl, 1964). Veel kwelindicatoren en bewoners van brongebieden zijn aangepast aan relatief constante lage watertemperatuur. Bij toenemende wisseling of verhoging van de temperatuur zullen ze verdwijnen omdat de temperatuur waarden aanneemt die buiten hun fysiologisch bereik vallen.
3. **Gedrag.** Om aan de negatieve effecten van stroming te ontsnappen kunnen dieren bij toenemende stroomsnelheid of waterbeweging zich vasthechten aan substraten of zich verschuilen op luwteplekken op of in de bodem (Wisseman & Anderson, 1984; Tolonen et al., 2001).
4. **Levenscyclus.** Veel beken en rivieren vertonen een seizoenspatroon in stroming, stagnatie, droogval en piekafvoeren. Veel diersoorten kunnen hun levenscyclus hebben aangepast aan dit patroon en maken het grootste deel van hun ontwikkelingscyclus in het winterhalfjaar door zodat ze in de zomer eventuele droogte en hoge temperaturen kunnen weerstaan in een resistent stadium (vaak als ei), anderen gaan in diapauze (rusttoestand) om extreme omstandigheden te vermijden. Planten die uit vegetatieve delen weer opnieuw kunnen uitgroeien gebruiken dit als strategie om zich tijdens een extreme afvoer of bij overstroming te verspreiden en op andere plaatsen weer uit te groeien. Vissen stellen in verschillende levensstadia andere eisen aan stroming en migreren over kleinere of grotere afstanden, waarbij ze ook gebruik maken van stroming (larvale drift, Lechner et al., 2016) of hogere afvoeren ('go with the flow') (Jansen et al. 2007). Andere faunasoorten spreiden de risico's die optreden onder extreme omstandigheden door het aanmaken van stolonen, leggen van eitjes die langere tijd in rust kunnen blijven of vaker door als terrestrische adult te paren en de ei-afzetting te spreiden in tijd en ruimte (Lytle & Poff, 2004). Diersoorten maken ook gebruik van waterbeweging en stroming om zich met drijvende zaden of eivlotjes te verspreiden.

3 Maatregelen

Welke maatregelen genomen kunnen worden hangt samen met het hoofdwatertype in kwestie, de context (omgeving, landgebruik) waarin het zich bevindt en de waterbeweging en stroming die hierin optreedt. Maatregelen om de hydrologie te sturen zijn vooral effectief wanneer deze worden toegepast op een grote ruimtelijke schaal (Verdonschot et al., 2017) waarbij de locatiekeuze voor de maatregel water als ordenend principe (water als randvoorwaarde voor gebruiksfuncties) wordt gehanteerd (zie b.v. Water in Brabant 2030 (Anoniem, 2017)). Lokale en aanvullende maatregelen kunnen wel versterkend werken maar zijn weinig effectief als ze onafhankelijk van elkaar worden genomen. De maatregelen laten zich ordenen in de trits van conserveren vasthouden, bergen en afvoeren (zie ook Commissie WB21, 2000).

3.1 Beken en riviertjes

Beken zijn van nature continu vrij afstromend, waarbij gedurende het jaar wel wisselingen optreden in de afvoer, bijvoorbeeld tussen winter en zomer. Om een continue afvoer te garanderen moet water bovenstrooms en op de flanken van het stroomgebied worden vastgehouden. Het op grote schaal maximaliseren van het infiltreren van regenwater is noodzakelijk om significante hoeveelheden water vast te kunnen houden. Dit kan worden bereikt door:

- Het verwijderen/verminderen van drainerende structuren zoals greppels en drains in met name landbouwgebieden, maar ook in bosaanplant (bijv. rabatten).
- Het verminderen van verdamping in naaldbos door dit om te vormen naar loofbos.
- Het stoppen/verminderen van onttrekkingen van grond- en oppervlaktewater, zoals ten behoeve van beregening van landbouwgewassen, de drinkwaterwinning en industrieel proceswater.

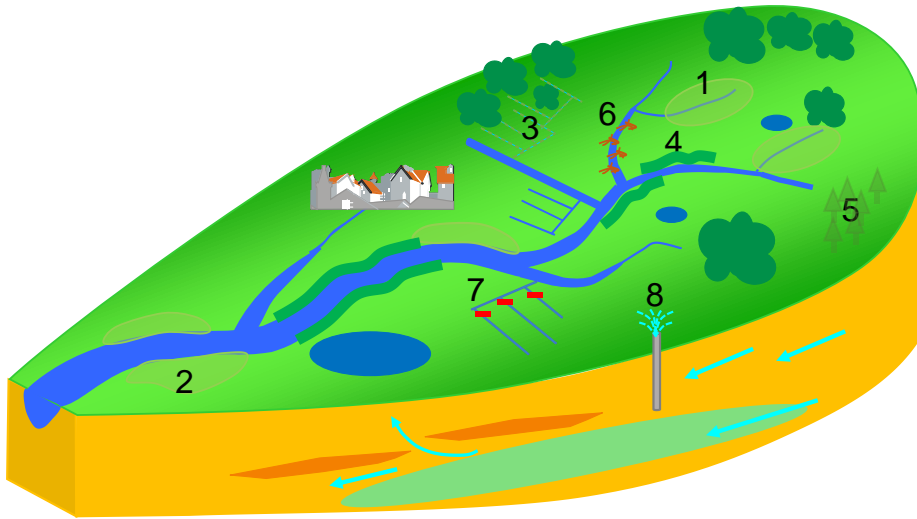
Daarnaast kan in het dal van de beek of het riviertje water worden geborgen door:

- Het ruimte geven voor de ontwikkeling van doorstroom- en beekmoerassen (Verdonschot et al., 2016; Verdonschot et al., 2017). Een doorstroommoeras ligt op de koppen van bovenloopjes en vormt een afvoersysteem waarin water een aanzienlijk deel van het jaar over maaiveld stroomt maar dusdanig ondiep dat het voor een belangrijk deel uit (semi)terrestrische vegetatie bestaat en waarin niet altijd een duidelijke stroomgeul vaak ontbreekt. Een beekmoeras heeft hetzelfde fysieke uiterlijk maar vormt een begeleidende zone langs het stromende oppervlaktewater. Beide typen moerassen houden water vast en geven dit geleidelijk weer af; ze bevorderen zo infiltratie en gaan versnelde afvoer tegen.
- Het aanleggen van retentievlaktes waar bij hoogwater water kan inunderen of wordt ingelaten, zodat dit de kans krijgt te infiltreren in plaats van dat het zo snel mogelijk naar benedenstrooms wordt afgevoerd.

Op lokale schaal zijn aanvullende maatregelen voor een voor het ecosysteem continue, gematigd dynamische afvoer mogelijk:

- Het voorkomen van versnelde boven- en ondergrondse afvoer naar de beek door de aanleg van (hydrologische) buffers tussen perceel en waterlichaam, zoals bosstroken en walletjes.
- Het voorkomen van versnelde boven- en ondergrondse afvoer naar de beek door het dempen of verwijderen van drainerende structuren op aanliggende percelen.
- Het vertragen van de afvoer door de beek of het riviertje door het aanbrengen van afvoer vertragende structuren zoals het achterwege laten van het maaien van de vegetatie in de watergang en het verwijderen van hout of het aanbrengen van houtpakketten wanneer omringend bos/houtwal aanwezig is (Harmon et al., 1986; Murphy & Koski, 1989; Webster et al., 1999; Verdonschot et al., 2017). Een vertraagde doorstroming moet gewaarborgd blijven en hoogwaterafvoeren moeten over de structuren heen vrij kunnen plaatsvinden (Verdonschot et al. 2012).
- Het vertragen van de afvoer door het veranderen van de morfologie van de waterloop, in termen van het verkleinen van de natte doorsnede, het verlengen van de weglengte (kronkelen indien voldoende afvoer jaarrond gewaarborgd is). Verkleinen van het profiel kan door suppleren van zand in combinatie met dood hout drempels of door het toelaten van geleidelijke sedimentatie, bijvoorbeeld tussen waterplantenpakketten.
- Het verwijderen van kunstwerken, zoals (knijp)stuwen, vistrappen (zonder vrije afvoer) en andere 'bottlenecks' om volledige doorstroming te stimuleren. Mochten vistrappen noodzakelijk zijn dan moet het gehele jaar rond minimaal 20% van de afvoer ongestoord kunnen doorstromen.

- Het vergroten van kunstwerken, zoals duikers met vrije permanente doorstroming en het creëren van een vrij overspannende bruggen om het natuurlijke stromingspatroon ruimte te geven.



Figuur 1: Brongerichte maatregelen in het stroomgebied om de water vast te houden: 1: aanleggen doorstroommoerassen, 2: aanleggen beekbegeleidende moerassen, 3: bevorderen infiltratie in ondergrond, 4: het aanbrengen van bufferzone/houtwallen, 5: omvormen naaldbos naar loofbos, 6: verminderen versnelde afvoer door niet maaien of dood hout inbrengen, 7: vertragen afstroming door verminderen drainerende greppels, sloten, drainage, 8: verminderen onttrekkingen.

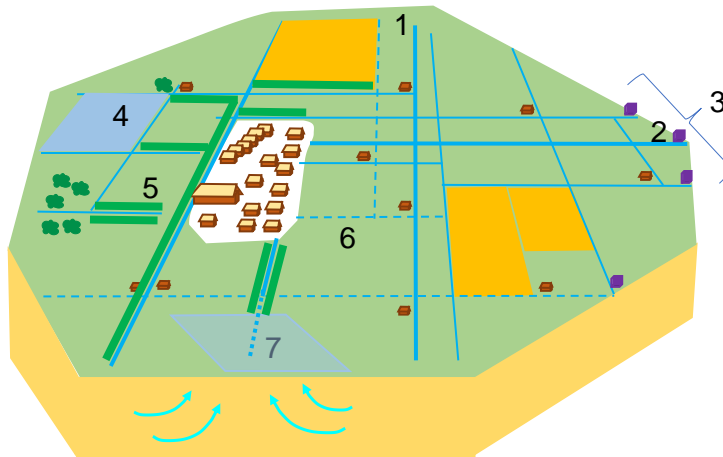
- In de bedding van een beek of riviertje is het doel voldoende beddingreliëf en structuren na te streven om ook op microschaal stromingsvariatie te krijgen (Keller & Swanson, 1979; Tolkamp, 1980). Achterwege laten van onderhoud en boomwortels in de oever hun werk laten doen helpt hierbij.

3.2 Sloten en kanalen

In gebieden die geen vrije afstroming hebben kunnen hydrologische maatregelen op grote ruimtelijke schaal wel een belangrijke bijdrage leveren, met als neveneffect een verbetering van de waterkwaliteit. Door het huidige waterbeheer in polders en boezems met een zo constant mogelijk peil is de buffer- en de bergingscapaciteit van het systeem te klein, waardoor bij ieder overschot of tekort direct gecompenseerd moet worden door uit- respectievelijk inlaat. Net zoals in stromende wateren is ook hier vasthouden, bergen en vertraagd aan- of afvoeren het devies. Om water vast te houden dient de infiltratie van regenwater te worden gemaximaliseerd; een grootschalige maatregel. Tijdelijke berging vertraagd de doorstroomsnelheid van het systeem en stabiliseert daarmee de milieu-omstandigheden. Vertraagd aan- en afvoeren is de belangrijkste stuurknop. Dit kan worden bereikt door:

- Het zoveel mogelijk toestaan van natuurlijke peilfluctuaties en in ieder geval voorkomen dat peilen omgekeerd of constant zijn.
- Het vertragen en waar mogelijk verwijderen (wanneer slechts sprake is van doorvoer) van het principe van aan- en afvoer van water en overgaan tot een systeem gericht op vertragen en conserveren.
- Het inrichten van gebieden aan de hand van de natuurlijke geomorfologische en hydrologische omstandigheden met eenzijdig afwaterende sloten(stelsels).
- In plaats van grote gemalen gebruik maken van door een gebied gespreide meerdere gemalen met een lage capaciteit.
- Het omvormen van het aan- en afvoernetwerk van water door sloten alleen eenzijdig aan te takken en via een zo lang mogelijke weglengte door een polder of ander vlak gebied eenzijdig te laten afwateren.

- In polders met relatief veel kwel, zoals langs het IJsselmeer, kan water intern circuleren, zodat geen water ingelaten hoeft te worden (Kuypers et al., 1999). Hetzelfde geldt voor kwelkernen binnen polders.
- Het aanpassen van drainerende structuren van de sloten en kanalen (incl. boezemwateren) en ook van vaak in de percelen aanwezige greppels en drains. Dit kan leiden tot hogere grondwaterstanden in het midden van percelen, een ruimtelijk herinrichting kan juist deze natte delen van een meer extensieve functie voorzien terwijl de overige voor de betreffende gebruiksfunctie zijn.
- Het stoppen/verminderen van onttrekkingen aan grond- en oppervlaktewater, zoals ten behoeve van beregening, drinkwaterwinning en industrieel proceswater en deze te verplaatsen naar grote wateren.
- Het laten staan van waterplanten om het water langer in de haarvaten te houden.



Figuur 2: Maatregelen in polder om water te conserveren: 1: eenzijdig laten afwateren en de weglengte vergroten, 2: natuurlijk peil instellen, 3: spreiden van meerdere laag-capaciteit gemalen over de polder voor gerichte waterbeheersing, 4: aanleggen van retentiebekken, 5: instellen van bufferzones, 6: verwijderen/dichten van sloten, 7: gericht afvangen van kwel en piekafvoeren.

Op lokale schaal zijn aanvullende maatregelen:

- Het inrichten van kleinere en grotere bergingsgebieden binnen het poldersysteem.
- Het continu op een zo laag mogelijk in- (tijdens droogte) uitpompingsnelheid (tijdens natte periode) laten draaien van gemalen om de waterbeweging te verminderen en te stabiliseren. Vooral na regenperiodes veel langzamer het peil weer laten zakken en bij droogte geleidelijk aanvullen. Het decentraliseren van gemaalcapaciteit draagt hier ook in belangrijke mate aan bij.

3.3 Plassen en meren

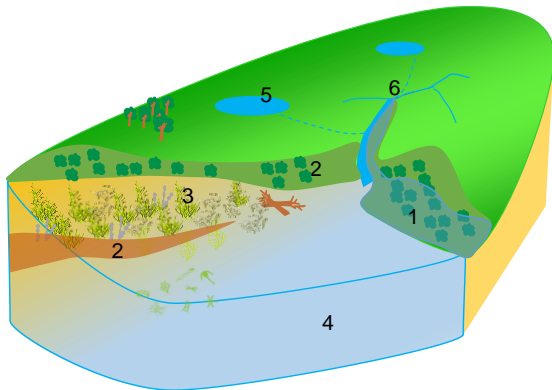
Ook plassen en meren hebben een omgeving die de waterbeweging beïnvloedt. Om de belangrijkste factor wind die waterbeweging veroorzaakt te sturen is wind- en golfbreking een mogelijkheid wat extra habitatheterogeniteit oplevert naast minder waterbeweging. Dit effect wordt kleiner naarmate het wateroppervlak groter wordt. Maar het kan ook zijn dat de waterbeweging juist bijdraagt aan habitatdiversiteit door interne sortering van bodemmateriaal (drijfbladplanten aan westzijde van uiterwaardplassen waar het organisch materiaal zich ophoopt). Er zijn verschillende fysieke inrichtingsmogelijkheden beschikbaar:

- Om oevers te beschermen tegen erosie door golfslag worden natuurlijke, geleidelijke overgangen van diep naar ondiep naar semi-terrestrisch aangelegd of beschermd; het gaat hierbij om diep-kaal, ondiep-litorale begroeiing, semi-terrestrisch-moeras overgangen.
- Riet, wilgen en andere oevervegetatie leggen de oever op een natuurlijke manier vast en de ondiepe zones die de groeiplaatsen vormen dempen de golven (Ostendorp et al., 1995). Om natuurlijke vegetatie-ontwikkeling op de oevers te krijgen en handhaven is een natuurlijk peil nodig (Coops & Hoesper, 2002).
- Vooroevers, strek- en dwarsdammen helpen bij het breken van de golven en verminderen erosie (Söhngen et al., 2008; Gabel et al., 2017).
- Naast begroeiing kunnen vormveranderingen van de oeverlijn erosie verminderen (Sollie et al., 2008).

- Het uitdiepen van centrale delen van een plas of meer (Penning et al., 2010) om bijvoorbeeld ook diepere overwinteringshabitats te verkrijgen.
- Het bedekken van een bodem met fijn slib met grover materiaal (zand) om opwerveling te verminderen (van Geest et al., 2005).

Per plas of meer zijn de volgende hydrologische maatregelen mogelijk om de waterbeweging te verminderen en het waterlichaam te isoleren om de ecologische omstandigheden te optimaliseren:

- Het (zoveel mogelijk) afkoppelen van de plas of het meer van het waternetwerk (boezemstelsel) waardoor mogelijkheden ontstaan om het waterlichaam te isoleren en een natuurlijk peil in te stellen (Coops, 2002), de waterbewegingen sterk te verminderen en het waterlichaam laten bijdragen als waterberging. Soms is connectiviteit nodig maar uit studies is gebleken dat isolatie ook leidt tot hogere β -diversiteit.
- Ruimte toewijzen voor inundatiezones en -polders rondom het meer of plas om waterbeweging natuurlijker te laten verlopen. Dit is een maatregel die ook het ecologisch functioneren van de plas of het meer in belangrijke mate versterkt.
- Het voorkomen dat water op het waterlichaam wordt geloosd, denk ook aan het voorkomen van thermische lozingsen vooral in gestratificeerde systemen om extra turbulentie te voorkomen.
- Het zoveel mogelijk toestaan van natuurlijke peilfluctuaties.



Figuur 3: Maatregelen om de waterbeweging in een plas/meer te dempen: 1: ruimte te geven aan inundatie van de moerassige oeverzone, 2: vastleggen oeverzone met oeverbegroeiing (riet/wilgen) en een natuurlijk peil instellen, 3: ondiepe vooroeverzone om litorale vegetatie te ontwikkelen, 4: verdiepen, 5: niet van oorsprong aangetakte wateren afkoppelen, 6: water vasthouden door toename van de retentie in het achterland.

In heel kleine plasjes en poelen speelt waterbeweging veel minder een rol. Er kan wel een (zeer) tijdelijke stratificatie optreden tijdens zonnige perioden die bij afkoeling tot waterbeweging leidt. Voor het overig zijn de bovengenoemde hydrologische maatregelen op kleine schaal ook op deze kleine waterlichamen van toepassing.

3.4 Vergroten van de ecologische systeemkwaliteit

Maatregelen zijn vanuit een ecologisch perspectief alleen effectief wanneer ze de stressoren wegnemen die verhinderen dat de gewenste soorten zich vestigen of toenemen. Omdat er in de Nederlandse situatie altijd sprake is van multiple stress situaties, zijn altijd meerdere maatregelen nodig; oftewel een maatregelpakket. In verleden namen we vooral maatregelen waarbij de invloed van één stressor werd verkleind zonder de andere stressoren aan te pakken. Hierdoor werd na de ingreep het effect van de volgende stressor duidelijker en verhinderde dit het optreden van herstel. Om dit te voorkomen is een ecologische systeemanalyse nodig. Deze analyse brengt alle stressoren gekwantificeerd in beeld en geeft richting aan de noodzakelijk maatregelen die een maatregelpakket moet bevatten om effectief te ecologische kwaliteit te verbeteren. Tevens geeft een ecologische systeemanalyse niet alleen knelpunten aan voor een bepaalde organismegroep, maar juist ook informatie over hoe het systeem functioneert. Omdat organismegroepen ieder op hun eigen schaal in ruimte en tijd functioneren, omvat een ecologische systeemanalyse altijd meerdere schaalniveaus. Maatregelpakketten hebben dezelfde dekking in ruimte en tijd nodig als zodat ze aansluiten op de schaal waar de stressoren actief zijn.

3.5 Versterken van dispersieroutes en bronpopulaties.

In ieder stilstaand en stromend oppervlaktewater treden natuurlijke en antropogene verstoringen op die soorten kunnen doen verdwijnen. Het versterken van bronpopulaties, populaties die als bron dienen om andere plekken te (her)koloniseren begint met het lokaliseren hiervan. Kennis over het voorkomen van kenmerkende of gevoelige en stromingsminnende soorten in het beheergebied is hierbij essentieel (zie ook KIWK Factsheet Dispersie en connectiviteit], net zoals kennis over de eisen die deze planten- en diersoorten aan stroming of waterbeweging c.q. zuurstofgehalten gedurende het doorlopen van hun levenscyclus stellen. Hierop kan vervolgens worden ingezet door maatregelen te nemen die deze eisen in betreffend oppervlaktewater optimaliseren. Groei van de lokale populaties zorgt ervoor dat er meer potentiële kolonisten beschikbaar komen (soms zelfs als respons op hoge populatiedichtheden), waardoor de kans op (her)kolonisatie van andere wateren toeneemt. Om deze kans toe te laten nemen is ook de kwaliteit van de dispersieroute van belang. Dispersie via het water kan alleen als de kwaliteit in het tussenliggende beektraject voldoende geschikt is. Verspreiding via de lucht stelt vaak ook eisen aan de vegetatie, zoals de aanwezigheid van een houtwal in de bufferzone.

4 Conclusies

- Stroming en andere vormen van waterbeweging hebben direct en indirect via andere sleutelfactoren (o.a. substraat, stoffen, temperatuur, connectiviteit) een zeer grote invloed op het ecologisch functioneren van zowel stromende als stilstaande wateren. In veel planten- en diersoorten zijn veel aanpassingen ontstaan om met stroming om te kunnen gaan en er gebruik van te kunnen maken. Iedere vorm van verstoring in de omvang, frequentie, duur, timing en voorspelbaarheid van deze factor heeft daardoor grote consequenties voor aquatische ecosystemen.
- Maatregelen die ingrijpen op de factor stroming zijn vooral effectief wanneer deze worden toegepast op een grote ruimtelijke schaal, maar zijn wel watertype-specifiek: beken en rivieren, polders en meren/plassen vragen om een eigen aanpak. Lokale en aanvullende maatregelen kunnen wel versterkend werken, maar hebben een beperkte invloed als ze onafhankelijk van elkaar worden genomen.
 - Retentie en infiltratie vergroten en onttrekking verminderen in de inziggebieden en het beek- of rivierdal zijn essentiële grootschalige maatregelen voor beken en rivieren.
 - In polders is zo veel mogelijk vertraagd af- of aanvoeren het devies.
 - In plassen en meren kan de invloed van windwerking door inrichting worden beïnvloed en is hydrologische isolatie maar tegelijkertijd het bij het systeem betrekken van de aanliggende inundatiegebieden of polders een oplossingsrichting.
- Maatregelen of maatregelpakketten zijn vanuit een ecologisch perspectief alleen effectief wanneer ze alle stressoren wegnemen. Om deze gekwantificeerd in beeld te krijgen is een systeemanalyse noodzakelijk die richting geeft aan het benodigde maatregelpakket dat nodig is om effectief de ecologische kwaliteit te verbeteren.

5 Literatuur

- Allan, J. D. (1995). Stream ecology: structure and function of running waters. Kluwer Academic publishers.
- Anoniem 2017. Water in Brabant 2030: wateragenda voor de Brabantse Omgevingsvisie. Provincie Noord-Brabant, Voorjaar 2017.
- Anthony, J. L. & Downing, J. A. (2003) Physical Impacts of Wind and Boat Traffic on Clear Lake, Iowa, USA, Lake and Reservoir Management, 19:1, 1-14, DOI: 10.1080/07438140309353984
- Bengtsson, L. (1978). Wind induced circulation in lakes. Hydrology Research, 9(2), 75-94.
- Biggs, B. J., Goring, D. G., & Nikora, V. I. (1998). Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. Journal of Phycology, 34(4), 598-607.
- Boulton, A. J. (2003). Parallels and contrasts in the effects of drought on stream macroinvertebrate assemblages. Freshwater Biology, 48(7), 1173-1185.
- Commissie WB21 (2000). Waterbeleid voor de 21e eeuw; Geef water de ruimte en de aandacht die het verdient [Water policy for the 21st century; Give water the space and attention it deserves].

- Coops, H. (2002). Ecologische effecten van peilbeheer: een kennisoverzicht. Rapportnr.: 2002.041.
- Coops, H., & Hosper, S. H. (2002). Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands. *Lake and Reservoir Management*, 18(4), 293-298.
- Didderen, K. (2007). Dispersie: herstellende petgaten en de rol van dispersie (No. 1564). Alterra.
- Edwards, R. W., & Owens, M. (1962). The effects of plants on river conditions IV. The oxygen balance of a chalk stream. *The Journal of Ecology*, 207-220.
- Elliott, J. A., & Defew, L. (2011). Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature. In *Loch Leven: 40 years of scientific research* (pp. 105-116). Springer, Dordrecht.
- Gabel, F., Lorenz, S., & Stoll, S. (2017). Effects of ship-induced waves on aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 601, 926-939.
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., & Nathan, R. J. (2004). *Stream hydrology: an introduction for ecologists*. John Wiley and Sons.
- Gücker, B., & Pusch, M. T. (2006). Regulation of nutrient uptake in eutrophic lowland streams. *Limnology and Oceanography*, 51(3), 1443-1453.
- Harmon, M. E., Franklin, J. F., Swanson, F. J., Sollins, P., Gregory, S. V., Lattin, J. D., Anderson, N. H., Cline, S. P., Aumen, N. G., Sedell, R., Lienkaemper, G. W., Cromack, K. Jr. & Cummins, K. W. (1986). Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 15, 133-302.
- Hayashi, M., & Rosenberry, D. O. (2001). 6. Effects of groundwater exchange on the hydrology and ecology of surface waters. *Journal of groundwater hydrology*, 43(4), 327-341.
- Hayashi, M., & Rosenberry, D. O. (2002). Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Groundwater*, 40(3), 309-316.
- Hill, W. R., Ryon, M. G., & Schilling, E. M. (1995). Light limitation in a stream ecosystem: responses by primary producers and consumers. *Ecology*, 76(4), 1297-1309.
- Hynes, H. B. N., (1970). *The ecology of running waters* (Vol. 555). Liverpool: Liverpool University Press.
- Jaag, O. & Ambuhl, H., (1964). The effect of the current on the composition of biocoenoses in flowing water streams *Int. Conf. Wat. Pollut. Res. Lond.*, Pergamon Press, Oxford, pp. 33-49.
- Jansen, H.M., Winter, H.V., Bruijs, M.C. and Polman, H.J., 2007. Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. *ICES Journal of marine Science*, 64(7), pp.1437-1443.
- Keller, E. A., & Swanson, F. J. (1979). Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth surface processes*, 4(4), 361-380.
- Kristensen, P., Søndergaard, M., & Jeppesen, E. (1992). Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 228(1), 101-109.
- Kronvang, B., Jeppesen, E., Conley, D. J., Søndergaard, M., Larsen, S. E., Ovesen, N. B., & Carstensen, J. (2005). Nutrient pressures and ecological responses to nutrient loading reductions in Danish streams, lakes and coastal waters. *Journal of Hydrology*, 304(1-4), 274-288.
- Kuypers, A. (1999) Extreme neerslag en de afwatering van Fryslân. *Het Waterschap* 84 (2), 54-59.
- Lake, P. S. (2000). Disturbance, patchiness, and diversity in streams. *Journal of the north american Benthological society*, 19(4), 573-592.
- Lancaster, J., & Downes, B. J. (2010). Linking the hydraulic world of individual organisms to ecological processes: putting ecology into ecohydraulics. *River Research and Applications*, 26(4), 385-403.
- Lechner, A., Keckeis, H. and Humphries, P., 2016. Patterns and processes in the drift of early developmental stages of fish in rivers: a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 26(3), pp.471-489.
- Lytle, D. A., & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 94-100.
- Murphy, M. L., & Koski, K. V. (1989). Input and depletion of woody debris in Alaska streams and implications for streamside management. *North American Journal of Fisheries Management*, 9(4), 427-436.
- 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.
- Ostendorp, W., Iseli, C., Krauss, M., Krumscheid-Plankert, P., Moret, J. L., Rollier, M., & Schanz, F. (1995). Lake shore deterioration, reed management and bank restoration in some Central European lakes. *Ecological Engineering*, 5(1), 51-75.
- Peeters, F., Straile, D., Lorke, A., & Ollinger, D. (2007). Turbulent mixing and phytoplankton spring bloom development in a deep lake. *Limnology and oceanography*, 52(1), 286-298.
- Penning, W. E., Uittenbogaard, R., Ouboter, M. & van Donk, E. (2010). Local deepening of large shallow peat lakes: A measure to improve their ecological status. *Journal of Limnology* 69: 126-137.

- Poff, N. L. (1997). Landscape filters and species traits: towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, 16(2), 391-409.
- Reynolds, C. S. (1984). *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press.
- Roelofs, J. G. M. (1988). *Waterplanten en waterkwaliteit*. F. H. J. L. Bloemendaal (Ed.). Utrecht: Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging.
- Søballe, D. M. & B. L. Kimmel, 1987. A large-scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments. *Ecology* 68: 1943-1954.
- Söhngen, B., Koop, J.H.E., Knight, S.E., Rythönen, J., Beckwith, P., Ferrari, N., Iribarren, J., Kevin, T., Wolter, C. & Maynard, S.T. (2008). Considerations to Reduce Environmental Impacts of Vessels. Report of PIANC InCom Working Group 27. PIANC, Brussels, p. 90.
- Sollie, S., Coops, H. & Verhoeven, J. T. A. (2008). Natural and constructed littoral zones as nutrient traps in eutrophicated shallow lakes. *Hydrobiologia* 605: 219-233.
- Søndergaard, M., Kristensen, P., & Jeppesen, E. (1992). Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*, 228(1), 91-99.
- Speaker, R., Moore, K., & Gregory, S. (1984). Analysis of the process of retention of organic matter in stream ecosystems: With 3 figures and 1 table in the text. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 22(3), 1835-1841.
- Tolkamp, H. H. (1980). *Organism-substrate relationships in lowland streams* (Doctoral dissertation, Pudoc, Centre for Agricultural Publishing and Documentation).
- Tolonen, K. T., Hämäläinen, H., Holopainen, I. J., & Karjalainen, J. (2001). Influences of habitat type and environmental variables on littoral macroinvertebrate communities in a large lake system. *Archiv für Hydrobiologie*, 39-67.
- van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C., Kraak, M. H., & Verdonschot, P. F. (2018). Dissolved oxygen dynamics in drainage ditches along a eutrophication gradient. *Limnologica*, 72, 28-31.
- van Geest, G. J., Coops, H. Roijackers, R. M. M., Buijse, A. D. & Scheffer, M. (2005). Succession of aquatic vegetation driven by reduced water-level fluctuations in floodplain lakes. *Journal of Applied Ecology* 42(2): 251-260.
- Verdonschot, P. F. (2009). Impact of hydromorphology and spatial scale on macroinvertebrate assemblage composition in streams. *Integrated environmental assessment and management*, 5(1), 97-109.
- Verdonschot, P. F. M., Besse, A. A., de Brouwer, J. H. F., Eekhout, J. P. C., & Fraaije, R. (2012). *Beekdalbreed Hermeanderen: Bouwstenen voor de 'leidraad voor innovatief beek-en beekdalherstel'* (No. 2012-36). Stowa.
- Verdonschot, R., Runhaar, H., Buijse, T., Bijkerk, R., & Verdonschot, P. (2016). *Doorstroommoerassen en moerasbeken: typebeschrijvingen en ontwikkeling maatlatten voor de biologische kwaliteitselementen*. Wageningen Environmental Research.
- 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.
- Webster, J. R., Benfield, E. F., Ehrman, T. P., Schaeffer, M. A., Tank, J. L., Hutchens, J. J., & D'angelo, D. J. (1999). What happens to allochthonous material that falls into streams? A synthesis of new and published information from Coweeta. *Freshwater Biology*, 41(4), 687-705.
- Wiseman, R. W., & Anderson, N. H. (1984). Mortality factors affecting Trichoptera eggs and pupae in an Oregon Coast Range watershed. *Series Entomologica*.
- Wright, J. F., Furse, M. T., & Armitage, P. D. (1994). Use of macroinvertebrate communities to detect environmental stress in running waters (No. 4, pp. 15-34). *Freshwater Biological Association*.