



Inventarisatie van nieuwe monitoringstechnieken in het waterbeheer

Ontwikkeling van een nieuwe richtlijn voor adaptieve monitoring om te leren van uitgevoerde (her)inrichtingsprojecten

G.H. van der Lee & R.C.M. Verdonschot



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Inventarisatie van nieuwe monitoringstechnieken in het waterbeheer

Ontwikkeling van een nieuwe richtlijn voor adaptieve monitoring om te leren van uitgevoerde (her)inrichtingsprojecten

G.H. van der Lee & R.C.M. Verdonschot

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'MMIP Programma C4 Verbeteren van de waterkwaliteit' (projectnummer BO-43-123-003).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, april 2023

Gereviewd door:

Jip de Vries, Onderzoeker aquatische ecologie (Wageningen Environmental Research)

Akkoord voor publicatie:

Karin Andeweg, teamleider van Water en Food

Rapport 3250
ISSN 1566-7197

Van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C. M., 2023. *Inventarisatie van nieuwe monitoringstechnieken in het waterbeheer; Ontwikkeling van een nieuwe richtlijn voor adaptieve monitoring om te leren van uitgevoerde (her)inrichtingsprojecten*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3250. 28 blz.; 10 fig.; 0 tab.; 74 ref.

Trefwoorden: ecosysteem functioneren, hersteleecologie, monitoren, BACI, ruimte, tijd

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/589169> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & 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.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3250 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: sensor metingen in de Run

Inhoud

Verantwoording	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Schets kennisbehoefte	9
1.2 Doel en vraagstelling	9
1.3 Leeswijzer	9
2 Het opstellen van een maatregel-effect-monitoringsprogramma	10
2.1 Het belang van het BACI-ontwerp	10
2.2 Keuze van de te meten parameters	11
2.3 Keuze van de meetfrequentie, ruimtelijke dekking en meettechnieken	12
2.4 Keuze van de verwerking van de gegevens	13
2.5 Adaptieve monitoring	13
3 Hydrologie	14
3.1 Behoefte om op te schalen in ruimte en tijd	14
3.2 Opties voor nieuwe meettechnieken	14
4 Morfologie	16
4.1 Behoefte om op te schalen in ruimte en tijd	16
4.2 Opties voor nieuwe meettechnieken	17
5 Fysische chemie	18
5.1 Behoefte om op te schalen in ruimte en tijd	18
5.2 Opties voor nieuwe meettechnieken	19
6 Biologie	20
6.1 Behoefte om op te schalen in ruimte en tijd	20
6.2 Opties voor nieuwe meettechnieken	20
7 Aanbevelingen bij de implementatie van nieuwe meettechnieken	22
Literatuur	24



Verantwoording

Rapport: 3250

Projectnummer: BO-43-123-003

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Onderzoeker aquatische ecologie

naam: Jip de Vries

datum: 31-1-2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Karin Andeweg

datum: 30-03-2023

Samenvatting

Om de gewenste waterkwaliteitsdoelen voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) in de regionale watersystemen te bereiken en om de biodiversiteit op orde te krijgen, zijn de afgelopen jaren veel herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten uitgevoerd of gepland. Hoewel er veel wordt geïnvesteerd in de maatregelen, wordt er vaak geen monitoringsprogramma opgezet dat erop gericht is inzicht te krijgen in het uiteindelijke ecologische rendement van de maatregelen. Om de maatregeleffectiviteit te bepalen, wordt er meestal gebruikgemaakt van bestaande meetnetten, bijvoorbeeld de toestand en trendmonitoring ten behoeve van de KRW. Hierbij wordt er echter vaak niet op de juiste plekken en momenten in de tijd gemeten om uitspraken te kunnen doen over de maatregeleffectiviteit.

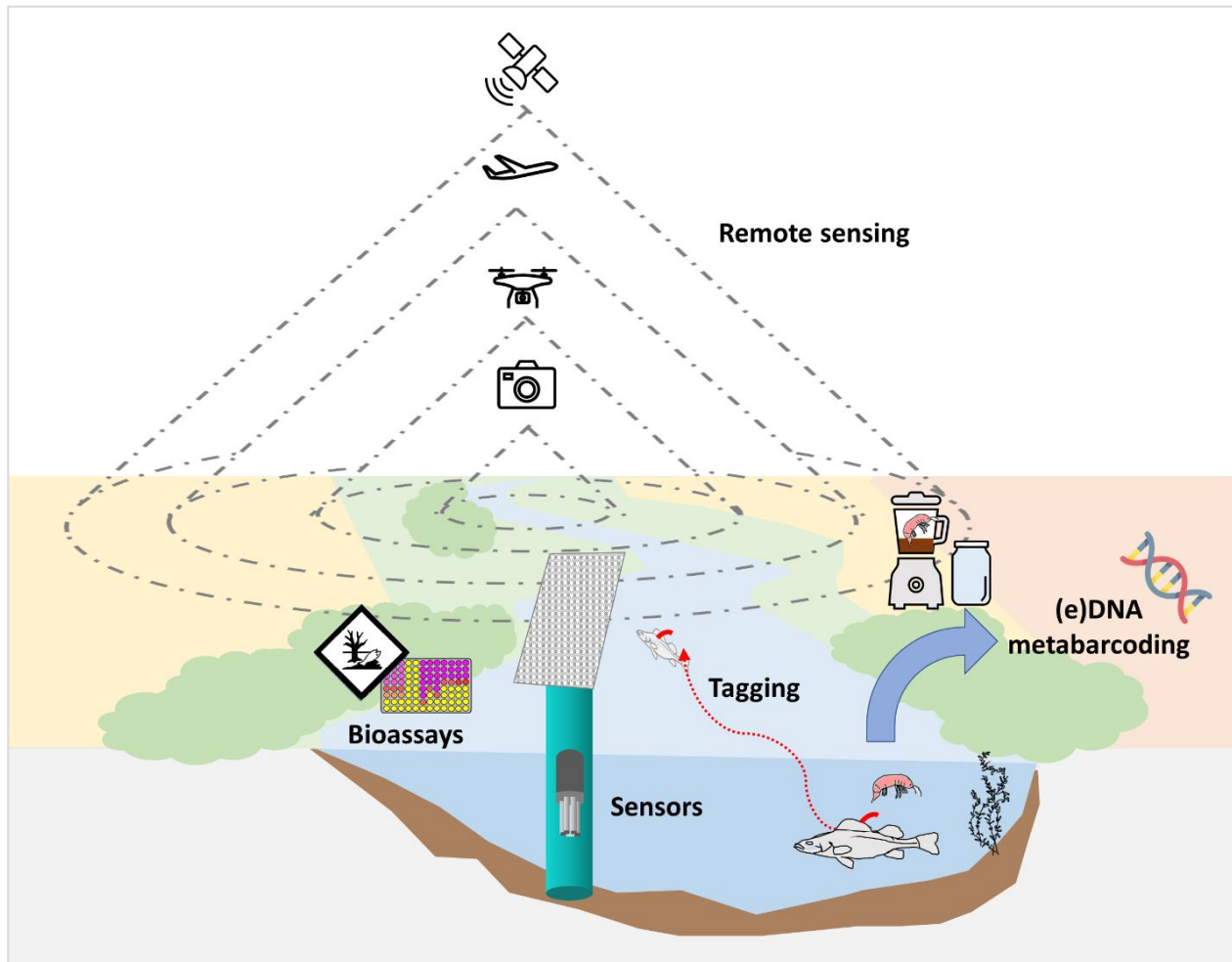
Het doel van dit rapport was om te onderzoeken hoe effectievere meetstrategieën kunnen worden ontworpen met een meer doelspecifieke benadering van herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten in oppervlaktewateren. De volgende vragen stonden hierbij centraal:

1. *Waarom is een opschaling van de monitoring in ruimte en tijd nodig voor een doelspecifieke benadering?*
2. *Welke nieuwe meettechnieken kunnen worden toegepast om op deze schaal te monitoren?*

De belangrijkste bevindingen die hieruit voortkomen, zijn (Figuur 1):

- In de huidige monitoring worden de waterstromen in het regionale watersysteem veelal in beeld gebracht met afvoermeetstations en meetstuwen die meestal benedenstrooms in een afwaterings- of deelstroomgebied zijn geplaatst. Op kleinere schaal worden hydrologische parameters, zoals stroomsnelheid en stromingsvariatie, echter bepaald op basis van 'punt-' en 'momentopnames'. De variatie van de stroomsnelheid in ruimte en tijd is echter belangrijk voor het voorkomen van veel soorten. Recente ontwikkelingen om stromingsvariatie in ruimte en tijd, te bepalen via videobeelden gemaakt met drones of time-lapse camera's, kunnen aan deze behoefte tegemoetkomen.
- De huidige monitoring van morfologie is vooral gericht op het vaststellen van de ruimtelijke configuratie van waterlichamen en de aanwezigheid van bepaalde substraten. Op basis van deze metingen kunnen belangrijke morfologische processen niet worden bepaald, zoals erosie en sedimentatie op grotere schaal en dynamiek in substraatpatronen op kleinere schaal. Om morfologische processen te meten, kan remote sensing met vliegende of drijvende platformen (grof detail, grote ruimtelijke schaal, lage temporele frequentie) of kunnen time-lapse camera's (fijn detail, kleine ruimtelijke schaal, hoge temporele frequentie) worden ingezet.
- Met de gangbare monitoringspraktijk voor het meten van fysisch chemische parameters wordt veelal maandelijks op een aantal plekken een steekmonster van het water genomen. Pieken in stofgehalten treden echter incidenteel in tijd op en variëren in de ruimte. Een groot aantal fysisch-chemische parameters kan hoogfrequent in de tijd worden gemeten met dataloggers met geïntegreerde sensoren. Voor nutriënten zijn betaalbare sensoren nog in ontwikkeling. Voor toxicanten is de combinatie van tijd-geïntegreerde passieve sampling en bioassays geschikt om temporele en ruimtelijke variatie in potentiële ecotoxicologische risico's aan te tonen.
- In de huidige biologische monitoring worden levensgemeenschappen slechts op één of enkele plekken in een waterlichaam bemonsterd. De aanwezigheid van lokale factoren kunnen echter voor grote ruimtelijke variatie zorgen. Daarnaast is het bij maatregel-effect-monitoring van belang dat de metingen worden herhaald over een langere tijdsperiode, zodat de biologische respons kan worden gevolgd en het project waar nodig kan worden bijgestuurd. Om deze ruimtelijke en temporele opschaling te bereiken met een gelijkblijvend monitoringsbudget, kunnen quickscan-methodes en DNA-technieken worden ingezet. Om naast de aanwezigheid van soorten ook inzicht te krijgen in de beweging en het gebruik van habitat in ruimte en tijd, kunnen grotere organismen worden voorzien van een zender en gevolgd worden met telemetriesystemen ('tagging').

Hoewel de nieuwe technieken veelbelovend zijn om de maatregel-effect-monitoring op te schalen in ruimte en tijd, zijn er enkele algemeen geldende uitdagingen bij de implementatie van deze technieken in monitoringsprogramma's. Om de implementatie van nieuwe meettechnieken in goede banen te leiden, wordt aanbevolen om prioriteit te geven aan: 1) de ontwikkeling van een richtlijn voor beste praktijktoepassingen, 2) het organiseren van onderhoud van de meetopstellingen, 3) het beschermen van meetopstellingen tegen vandalisme, diefstal, ongelukken etc., 4) het verwerken van 'grote' datastromen, 5) de vergelijking met huidige methoden en 6) de vertaling van de gegenereerde gegevens naar ecologische interpretaties, zodat kan worden geleerd van de bemeeten uitgevoerde herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten.



Figuur 1 Verschillende opties voor nieuwe monitoringstechnieken.

1 Inleiding

1.1 Schets kennisbehoefte

Om de gewenste waterkwaliteitsdoelen voor de Kaderrichtlijn Water (KRW) in de regionale watersystemen te bereiken en om de biodiversiteit op orde te krijgen, zijn de afgelopen jaren veel herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten uitgevoerd of gepland (Dos Reis Oliveira et al., 2020). Een telkens terugkerende vraag hierbij is of de ecologie wel voldoende verbeterd door de genomen maatregelen. En indien dit niet het geval blijkt, welke maatregelen zijn er dan extra nodig om de doelen wel te bereiken?

Uit de Kennisimpuls Waterkwaliteit (KIWK) is naar voren gekomen dat deze vragen op dit moment lastig te beantwoorden zijn. Hoewel er veel wordt geïnvesteerd in de maatregelen, wordt er vaak geen monitoringsprogramma opgezet dat erop gericht is inzicht te krijgen in het uiteindelijke ecologische rendement van de maatregelen. Ook wordt niet bekeken wat er moet worden aangepast wanneer het doelbereik achterblijft (Van der Lee et al., 2022a; Van Noord et al., 2022). In plaats van gerichte monitoring wordt er meestal gebruikgemaakt van bestaande meetnetten, bijvoorbeeld de toestand en trendmonitoring ten behoeve van de KRW. Hierbij wordt er echter vaak niet op de juiste plekken en momenten in de tijd gemeten om uitspraken te kunnen doen over de maatregeleffectiviteit (Van der Lee et al., 2022b). Het opschalen van deze metingen om een grotere dekking in ruimte en tijd te verkrijgen, is met de huidige technieken een arbeidsintensieve en daarmee kostbare aangelegenheid.

Er is het afgelopen decennium echter een grote ontwikkeling geweest op het gebied van sensoren en dataopslag, moleculaire technieken, remote sensing en andere meettechnieken. Om in toekomstige projecten meer te kunnen leren van uitgevoerde herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten in het waterbeheer, biedt de inzet van deze nieuwe dan wel aangepaste meettechnieken mogelijkheden (Dafforn et al., 2015; Roni et al., 2019).

1.2 Doel en vraagstelling

In het kader van beleidsondersteunend onderzoek voor het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit werkt Wageningen Environmental Research aan een nieuwe richtlijn voor adaptieve monitoring. Het doel is om te onderzoeken hoe effectievere meetstrategieën kunnen worden ontworpen met een meer doelspecifieke benadering van herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten in oppervlaktewateren.

Dit rapport vormt een inventarisatie van de mogelijkheden om aangepaste en nieuwe meettechnieken in te zetten in het ecologisch waterbeheer. De volgende vragen stonden hierbij centraal:

3. *Waarom is een opschaling van de monitoring in ruimte en tijd nodig voor een doelspecifieke benadering?*
4. *Welke nieuwe meettechnieken kunnen worden toegepast om op deze schaal te monitoren?*

1.3 Leeswijzer

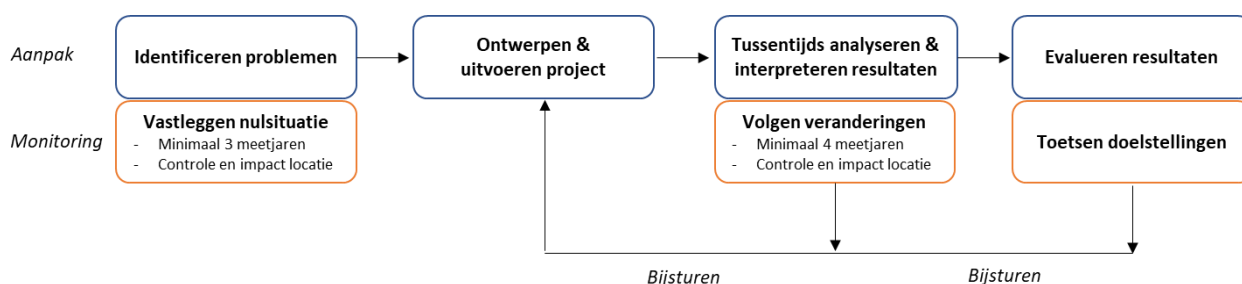
In hoofdstuk 2 worden eerst richtlijnen gegeven voor het opstellen van een maatregel-effect-monitoringsprogramma. Vervolgens wordt voor de verschillende parameters waarop herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten effect kunnen hebben besproken waarom een opschaling van de metingen in ruimte en tijd nodig is en welke nieuwe meettechnieken toepasbaar zijn om op deze schaal te kunnen monitoren. Het gaat hierbij om hydrologische parameters (hoofdstuk 3), morfologische parameters (hoofdstuk 4), fysisch-chemische parameters (hoofdstuk 5) en om de biologie (hoofdstuk 6). Tot slot wordt in hoofdstuk 7 ingegaan op de uitdagingen die de implementatie van deze nieuwe meettechnieken met zich meebrengt en aanbevelingen om deze implementatie in goede banen te leiden.

2 Het opstellen van een maatregel-effect-monitoringsprogramma

Maatregel-effect-monitoring heeft als doel vast te stellen of herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten al dan niet effectief zijn, zodat via deze kennis een terugkoppeling kan plaatsvinden naar het beheer en/of het beleid, wat kan leiden tot bijsturing, voortzetting of uitvoering elders van de maatregel(en) (Van der Lee et al. 2022b). De complete monitoringscyclus is weergegeven in Figuur 2.

Een maatregel-effect-monitoringsprogramma bestaat uit het vastleggen van de nulsituatie op een impactlocatie (waar de maatregel genomen gaat worden) en een controlelocatie (die niet onder invloed komt te staan van de te nemen maatregel) en het volgen van de veranderingen in de tijd na het uitvoeren van het project (zie paragraaf 2.1). De wijze waarop het monitoringsprogramma wordt opgesteld, verschilt echter van gebied tot gebied, omdat dit afhankelijk is van gebiedsspecifieke factoren en knelpunten, maar ook van project tot project, afhankelijk van de gestelde doelen en de genomen maatregelen. Daarnaast bepaalt de financiële ruimte binnen een project de omvang van een monitoringsprogramma.

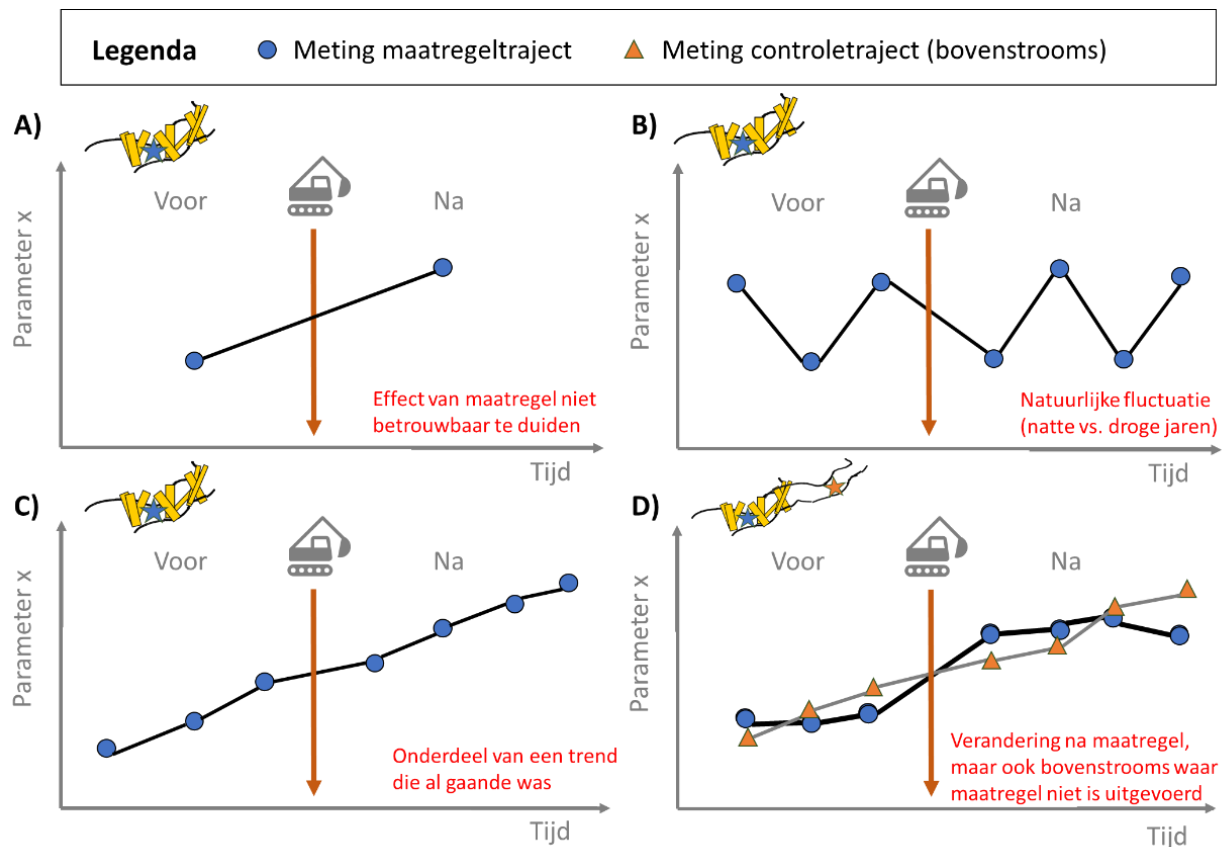
Bij het opstellen van het monitoringsprogramma staat een drietal vragen centraal (Kemmers et al. 1995, Van der Lee et al. 2022b): 1) Wat moet er worden gemeten? 2) Waar, wanneer en hoe moet er worden gemeten? 3) Hoe moeten de data worden verwerkt? Deze vragen worden toegelicht in paragraaf 2.2-2.4. Verder is het van belang dat de voortgang tussentijds en aan het eind van het project wordt geëvalueerd, zodat het project kan worden bijgestuurd wanneer het doelbereik achter blijkt te blijven (paragraaf 2.5).



Figuur 2 De aanpak van een herstel-, (her)inrichtings- of beheerproject in relatie tot de adaptieve monitoringscyclus.

2.1 Het belang van het BACI-ontwerp

Om inzicht te verkrijgen in de veranderingen die optreden na het uitvoeren van een project is het van groot belang dat het monitoringsprogramma wordt ingericht volgens het voor-na-controle-impact(maatregel)-ontwerp (het 'BACI-design', wat staat voor 'before-after-control-impact-design'; Stewart-Oaten et al., 1986, Smokorowska & Randall 2017; Van der Lee et al. 2022b). Bij dit meetontwerp worden voldoende metingen in de tijd vóór (effectiefst is minimaal drie meetjaren) en ná (minimaal vier, maar bij voorkeur meer meetjaren) het uitvoeren van het project genomen, zodat de veranderingen als gevolg van de maatregel(en) kunnen worden onderscheiden van de natuurlijke variatie en trends die al gaande zijn op de meetlocaties (Figuur 3A-C). Daarnaast is het van belang dat zowel in het maatregeltraject als in een of meerdere controletrajecten wordt gemeten, zodat onderscheid kan worden gemaakt tussen het effect van de uitgevoerde maatregel(en) en grootschalige ontwikkelingen die overal plaatsvinden (Figuur 2D). Het controletraject bestaat bij voorkeur uit een traject dat vergelijkbaar is met het hersteltraject vooraf, maar waar geen maatregel(en) zijn genomen. Ook kan de gewenste situatie (bijvoorbeeld een natuurgebied) worden meegenomen als controletraject, maar dan is de uitgangssituatie minder vergelijkbaar met het hersteltraject.



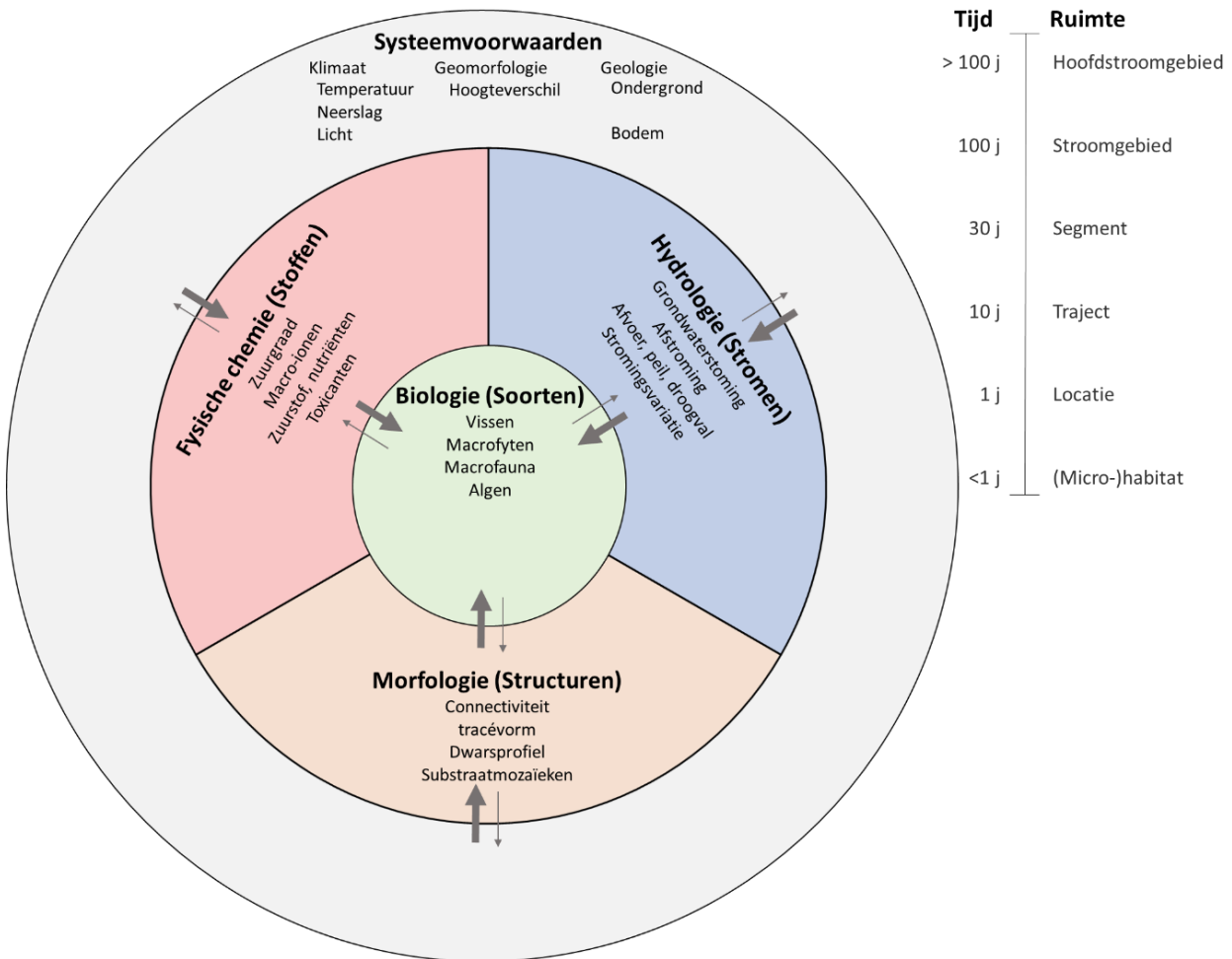
Figuur 3 Voorbeeld van monitoring in de tijd (A-D) en in de ruimte (D) van een houtinbreng-project in een beek om te laten zien dat met een beperkte set aan metingen het effect van een maatregel op parameter x op een locatie (bolletjes) niet kan worden aangetoond (A), omdat deze verandering onderdeel kan uitmaken van een natuurlijke fluctuatie (bijv. natte en droge jaren) (B), een trend die al gaande was (C) of omdat deze verandering ook op een locatie bovenstrooms (driehoekjes) heeft plaatsgevonden waar de maatregel niet is uitgevoerd (D) (Van der Lee et al. 2022b).

2.2 Keuze van de te meten parameters

De keuze van de te monitoren parameters hangt direct samen met de doelstellingen van het project en daarmee met de genomen maatregel(en). Het uiteindelijke doel van herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten is veelal gericht op bepaalde soorten of levensgemeenschappen en aan de hand van deze biotische parameters zal de effectiviteit van een project altijd moeten worden geëvalueerd. Met uitzondering van het herintroduceren van soorten wordt getracht dit doel te bereiken door maatregel(en) te nemen die zijn gericht op het verbeteren van de abiotische levensomstandigheden van de beoogde soorten en levensgemeenschappen (Verdonschot et al., 1995). Soorten zullen echter niet altijd direct of op korte termijn (enkele jaren) reageren op een verandering in leefomstandigheden, bijvoorbeeld door trage kolonisatie als gevolg van het ontbreken van bronpopulaties in de nabijheid of de aanwezigheid van dispersiebarrières (Verdonschot & Verdonschot, 2021).

Om de effectiviteit van een ingreep toch op de korte termijn te kunnen evalueren, is het vaak wenselijk om ook veranderingen in de abiotiek te meten (Van der Lee et al., 2022b). De abiotische factoren en processen waarop herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten ingrijpen, kunnen worden onderverdeeld in de factorgroepen hydrologie (stroming), morfologie (structuren) en fysische en chemische factoren (stoffen) (Figuur 4, Verdonschot et al., 1995). De keuze van de te monitoren abiotische parameters verschilt per project. Er moet namelijk gebruik worden gemaakt van de selectie van parameters die het best reageert op de genomen maatregel(en) onder de gegeven systeemvoorwaarden. Wanneer een maatregel bijvoorbeeld is gericht op het terugdringen van organische verontreiniging, kan het effect het best worden gevolgd door de zuurstofhuishouding en het organischestofgehalte te meten.

De term systeemvoorwaarden refereert aan de 'externe ruimte' waarin het project plaatsvindt, zoals het klimaat (temperatuur, neerslag), de geomorfologie (hoogteverschillen) en de geologie (ondergrond, bodem). Herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten van waterbeheerders zijn meestal niet gericht op de systeemvoorwaarden en monitoring van deze parameters binnen het project is aldus niet direct nodig. Het is echter wel belangrijk om kennis te hebben van de systeemvoorwaarden bij het plannen en uitvoeren van het project, omdat deze factoren wel degelijk effect kunnen hebben op de uitkomsten. Gegevensbronnen van derden zijn hiervoor goed bruikbaar, zoals klimatologische gegevens en geomorfologische kaarten. In dit rapport worden deze factoren niet verder toegelicht.



Figuur 4 Samenhang abiotische en biotische parameters, die spelen op verschillende ruimtelijke en temporele schaal (naar het 5S-model van Verdonschot et al., 1995).

2.3 Keuze van de meetfrequentie, ruimtelijke dekking en meettechnieken

De meetfrequentie en ruimtelijke dekking waarmee de gekozen parameters dienen te worden gemeten, zijn afhankelijk van de dynamiek van de te meten parameters (bijv. dag-en-nachtritmes en jaarfluctuaties, maar ook ruimtelijke variatie) en hun verwachte responstijd op de herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten (Figuur 3). Veranderingen in abiotische processen kunnen in veel gevallen vrij snel na het uitvoeren van een project worden gemeten en gevolgd (weken-maanden), terwijl de biologie vaak een langere periode (jaar-jaren) nodig heeft om tot ontwikkeling te komen (Verdonschot et al., 1995). Daarnaast stellen meettechnieken ieder eigen randvoorwaarden op welke schaal ermee kan worden gemeten.

Op dit moment wordt veelal gebruikgemaakt van meettechnieken die worden gebruikt voor reguliere KRW-monitoring. In hoofdstuk 3-6 wordt voor de verschillende abiotische en biotische parameters toegelicht waarom opschaling van deze metingen nodig is om een grotere dekking in ruimte en tijd te verkrijgen en welke nieuwe dan wel aangepaste meettechnieken hier mogelijk voor kunnen worden ingezet.

2.4 Keuze van de verwerking van de gegevens

De in het veld verzamelde gegevens moet worden verwerkt, geïnterpreteerd en vervolgens statistisch worden getoetst aan de gestelde doelen om te evalueren of de herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten de gewenste effecten hebben gehad. Voor de abiotiek zijn veranderingen in de processen relevant, zoals de verandering in hoeveelheid/omvang (hoe groot is de verstoring?), duur van optreden (hoelang houdt de verstoring aan?), frequentie van optreden (hoe vaak treedt de verstoring op?), het moment/periode van optreden (wanneer in het jaar treedt de verstoring op?) en plek van optreden (waar in de ruimte treedt de verstoring op?), gekoppeld aan de knelpunten voor soorten of levensgemeenschappen binnen de gestelde doelstelling (Poff & Ward, 1990). Voor de biotiek moeten veranderingen in trends (voor- of achteruitgang) van soorten en levensgemeenschappen op iedere bemonsterde locatie in de tijd worden bepaald (Wauchope et al., 2021). Voor de interpretatie van de biologische gegevens kan tevens gebruik worden gemaakt van de eigenschappen ('traits') van de soorten die zijn aangetroffen (zie Verdonschot & Verdonschot, 2021). Het 'Advies voor het monitoren van de ecologische waterkwaliteit' omvat een uitgebreide toelichting omtrent de verwerking van gegevens (Van der Lee et al., 2022b).

2.5 Adaptieve monitoring

Als uit tussentijdse metingen of de eindevaluatie van een project blijkt dat de abiotiek en biotiek veranderen in de richting van de doelstellingen van het project kan worden geconcludeerd dat de gewenste ontwikkelingen in gang zijn gezet of in het gunstigste geval zelfs bereikt zijn. Als de veranderingen echter afwijken van de verwachtingen is het van belang om de oorzaak te achterhalen. Hierbij komen vragen op als: Zijn de juiste maatregelen genomen? Zijn er nog andere knelpunten aanwezig? of Is de abiotiek verbeterd maar volgt de biotiek (nog) niet? Als de oorzaak is achterhaald, kan het zijn dat het project moet worden bijgestuurd door bijvoorbeeld (een) aanvullende maatregel(en) te nemen (= adaptieve monitoring; zie Figuur 2).

3 Hydrologie

Onder hydrologie (stroming) vallen alle variabelen die te maken hebben met grond- en oppervlaktewaterstromen. Systeemvoorwaarden van een stroomgebied, zoals neerslag, verdamping en hoogteverschillen, sturen de hydrologie. Hydrologische parameters zijn te onderscheiden in twee ruimtelijke schaalniveaus (Verdonschot et al., 1995): 1) Grote ruimtelijke schaal van een afwateringsgebied of (deel) stroomgebied: grondwater- en afstroming, peil, afvoer en droogval, 2) Kleine ruimtelijke schaal van een traject of habitat: stroomsnelheid, stromingsvariatie. Menselijk ingrijpen heeft de natuurlijke hydrologie sterk beïnvloed, door o.a. veranderd landgebruik, onttrekken van grondwater, omkeren van oppervlaktepelen, de aanleg van stuwen, het versneld afvoeren van water en klimaatverandering. De belangrijkste maatregelen ten behoeve van de factor stroming kunnen worden genomen in de bovenstroomse gebieden en omvatten het zo veel mogelijk lokaal vasthouden en infiltreren van water en sturen op een vertraagde afvoer naar benedenstreams en het verminderen van onttrekkingen (Verdonschot & Verdonschot, 2020a).

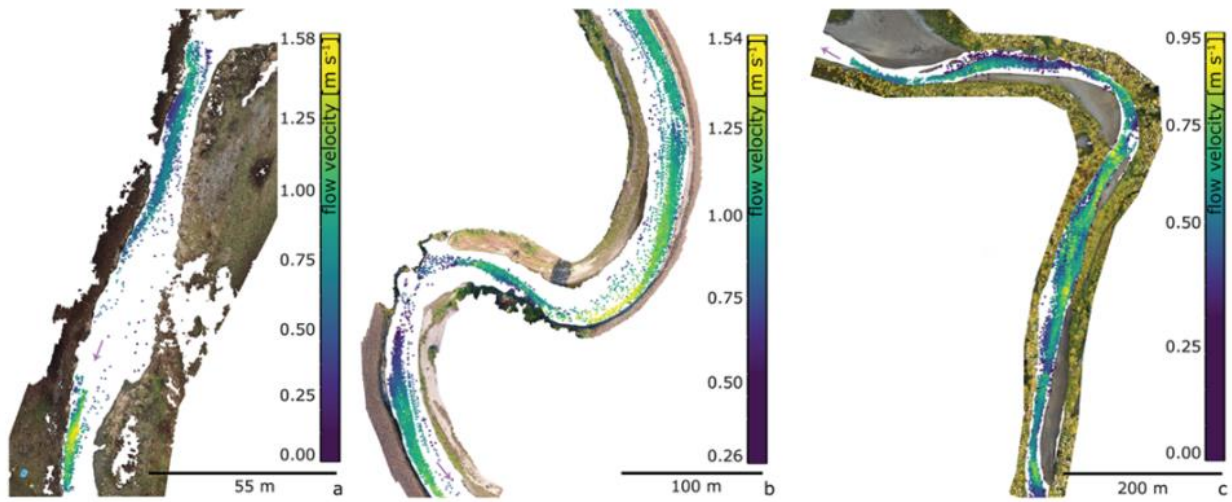
3.1 Behoeftte om op te schalen in ruimte en tijd

In de huidige monitoring worden de waterstromen in het regionale watersysteem veelal in beeld gebracht met afvoermeeetstations en meetstuwen, die meestal benedenstreams in een afwaterings- of deelstroomgebied zijn geplaatst. Hiervoor wordt de afvoer berekend aan de hand van waterniveauloggers in een vast doorstroomd profiel waarbij een hoge meetfrequentie (minimaal ieder uur) wordt gehanteerd (Kirchner et al., 2004; Roni et al., 2019). Op kleinere schaal wordt de stroomsnelheid van de regionale watersystemen echter slechts een aantal keer per jaar op een beperkt aantal meetpunten gemeten met een mechanische of elektromagnetische stroomsnelheidsmeter. Dit vindt bijvoorbeeld plaats parallel aan het meten van fysisch-chemische parameters (maximaal maandelijks) of tijdens de biologische monitoring (maximaal tweejaarlijks). In grote wateren (grote rivieren en kanalen) wordt daarnaast op verschillende locaties continu gemeten met akoestische Doppler-stroomsnelheidsmeters (ADCP) om het verticale en horizontale stromingsprofiel in beeld te brengen in een vast vlak. Daarnaast wordt een schatting gemaakt van de stromingsvariatie als parameter die deel uitmaakt van de veldgegevens tijdens de biologische monitoring (maximaal tweejaarlijks) of bij het uitvoeren van een *Gewässerstrukturgütekartierung* (eenmalig). Hierbij wordt telkens gebruikgemaakt van een indeling in een aantal klassen, bijvoorbeeld 'niet tot gering', 'matig' en 'groot'.

Voor veel soorten speelt de variatie van de stroomsnelheid in ruimte en tijd echter een belangrijke rol doordat hierdoor allerlei verschillende microhabitats ontstaan (Verdonschot et al., 1995). Deze stromingsvariatie kan in de loop van het jaar sterk variëren als gevolg van de dynamiek in de afvoer gedurende en tussen jaren. Om deze ruimtelijke en temporele stromingsvariatie te meten op een voor de biologie relevante schaal zijn daarom nieuwe technieken nodig.

3.2 Opties voor nieuwe meettechnieken

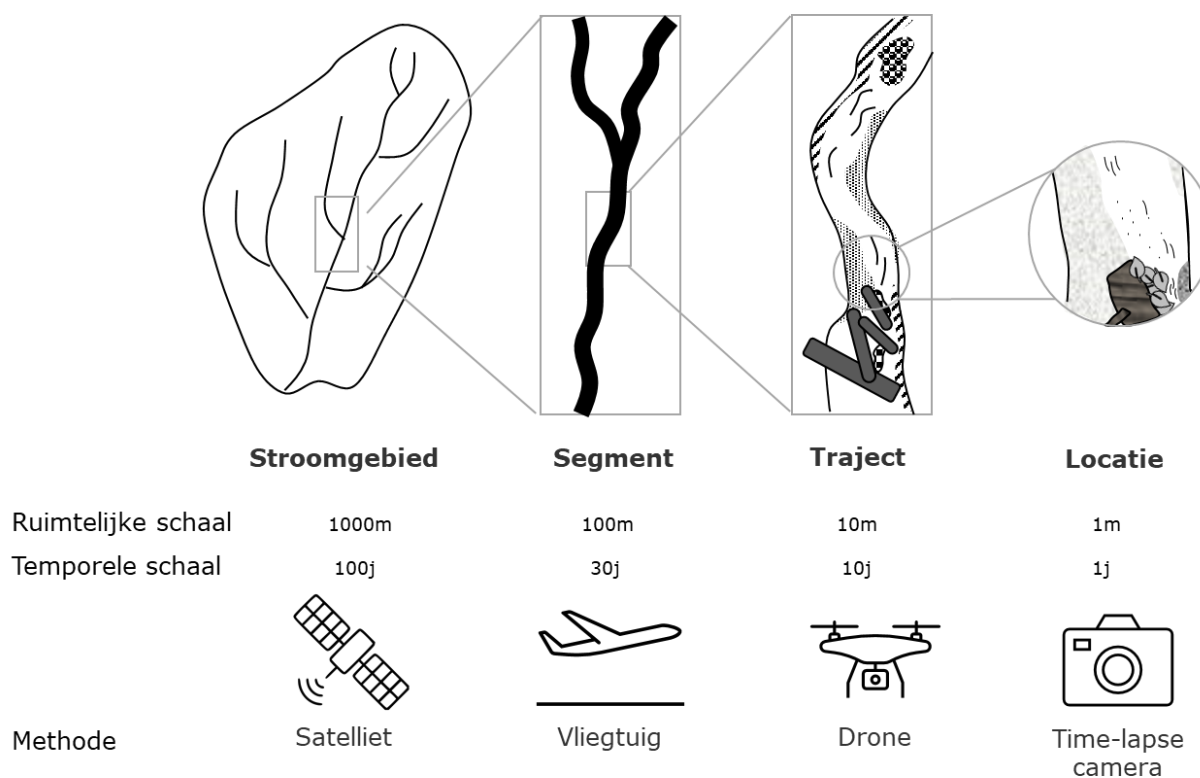
Er zijn recente ontwikkelingen om met videobeelden, gemaakt met drones of camera's bevestigd boven het wateroppervlak, de temporele en ruimtelijke veranderingen in de stroomsnelheid te meten (Figuur 5). De stroomsnelheid wordt hierbij bepaald op basis van de verplaatsing van deeltjes aan het wateroppervlak (Eltner et al., 2020; 2021). Het is echter nog niet onderzocht of deze nieuwe meettechniek ook toepasbaar is in Nederlandse wateren, omdat deze veelal een lagere gemiddelde stroomsnelheid hebben dan de snelstromende systemen waarop deze techniek eerder is toegepast.



Figuur 5 Voorbeeld stroomsnelheid in de ruimte gemeten met drone video's van de (a) Freiburger Mulde (Duitsland), (b) Sajo (Slowakije) and (c) Pulmanki (Finland) (Eltner et al., 2021).

4 Morfologie

De morfologie (structuren) in waterlichamen kan worden onderscheiden op basis van ruimtelijke schaal: van stroomgebied (bijv. tracévorm) tot locatie (bijv. aanwezigheid blad) (Figuur 6; Frissell et al., 1986). De morfologie wordt grotendeels gevormd door de hydrologie. Van oorsprong zijn de meeste waterlichamen in Nederland morfologisch stabiel. Dit houdt in dat onder invloed van (seizoens)variatie in de neerslag er bijvoorbeeld kortstondige veranderingen in de dimensies of de samenstelling van substraten optreden, maar dat de gemiddelde waarden niet of nauwelijks veranderen op de lange termijn. Dit evenwicht is in veel watersystemen echter verstoord door menselijke activiteit, zoals normalisatie en kanalisatie, maar ook door aanpassingen in de hydrologie en het schonen van waterlichamen (Verdonschot et al., 1995). Hierdoor kunnen grotere veranderingen in de vorm optreden dan van nature het geval was. Maatregelen om de morfologie te verbeteren, zijn gericht op het verbeteren van de tracévorm, het optimaliseren van beddingstructuren en het vergroten van variatie in substraatmozaïeken (Van der Lee et al., 2020).



Figuur 6 Hiërarchische verdeling van een beekstelsel met habitats (naar Frissell et al. (1986)) met bijpassende monitoringmethode. Remote sensing-platformen (satelliet, vliegtuig en drone) zijn geordend op afnemende ruimtelijke dekking, maar op toenemend detail van de beelden. Time-lapse-camera's kunnen mogelijk worden ingezet op een kleiner ruimtelijk oppervlak, maar met grotere temporele resolutie. Temporele schaal aangepast (naar Verdonschot et al., 1995).

4.1 Behoeftte om op te schalen in ruimte en tijd

Reguliere monitoring van structuren is veelal gericht op het vaststellen van de ruimtelijke configuratie van waterlichamen (o.a. tracévorm en -dimensies) en de aanwezigheid van bepaalde habitats (o.a. vaststellen van substraten). Op basis van deze 'punt-' en 'moment'-opnames is het lastig om variatie in ruimte en tijd in kaart te brengen en verandering in morfologische processen te begrijpen (Belletti et al., 2015; Woodget

et al., 2017'; Boothroyd et al., 2021). Op grotere ruimtelijke en temporele schaal wordt er bijvoorbeeld geen inzicht verkregen in processen als erosie en sedimentatie, die veranderingen in tracévorm en -dimensies kunnen veroorzaken (Nones, 2021). Op kleinere ruimtelijke en temporele schaal geven deze metingen geen inzicht in de dynamiek in substraatpatronen, een belangrijk sturend proces voor veel aquatische organismen (Verdonschot et al., 1995). In een natuurlijk systeem met matige stromingsdynamiek vormen continu veranderende pakketten van organisch materiaal met een stabiele kern een leefomgeving die geschikt is voor bijvoorbeeld een grote verscheidenheid aan macrofaunasoorten. Bij een verstoord systeem met lage stromingsdynamiek zijn deze pakketten ook stabiel, maar breken snel af waardoor lage zuurstofconcentraties ontstaan en veel soorten niet kunnen overleven. Bij een hoge stromingsdynamiek zullen de pakketten minder stabiel zijn en daardoor minder geschikte voedsel- en schuilplaatsen bieden (De Brouwer, 2020). Ook kunnen belangrijke onderdelen van de habitat tijdelijk bedekt raken met een laag zand of slib (Verdonschot et al., 2020).

4.2 Opties voor nieuwe meettechnieken

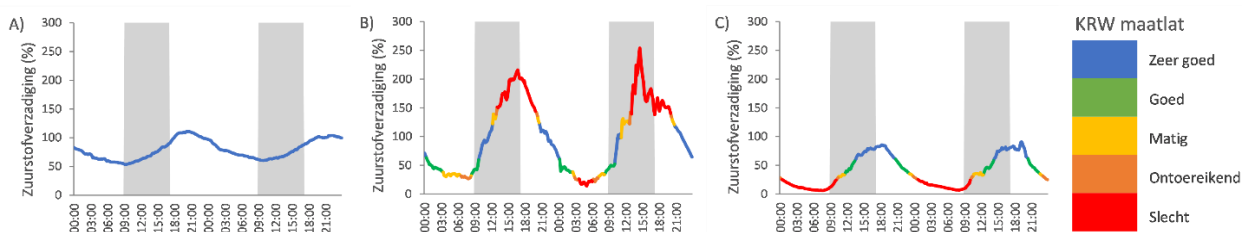
De ontwikkeling in digitale beeldvorming en beeldanalysetechnologie bieden mogelijkheden om morfologische processen met een hogere resolutie te monitoren (Blaas et al., 2016; Nones, 2021, Deltafact Remote sensing waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer). Welke meettechnieken het meest geschikt zijn, hangt af van de gewenste resolutie in ruimte en tijd (Woodget et al., 2017; Figuur 6). Naar een groter gebied kan bijvoorbeeld vlakdekkend worden gekeken door middel van remote sensing met een vliegend platform (Blaas et al., 2016). Hiermee kunnen niet alleen veranderingen in de tracévorm en -dimensies over tijd worden gekarteerd, maar ook bijvoorbeeld erosie van de oever en de aanwezigheid van groot dood hout (Marcus et al., 2012; Gilvear et al., 2016). Ook kan met remote sensing de onder water gedoken, emergente en drijvende vegetatiebedekking grotendeels in beeld worden gebracht (Santos et al., 2009; Marcus et al., 2012; Penning et al., 2020). Naast vliegende platformen kan gebruik worden gemaakt van een drijvend platform met echo sounding om onder water gedoken vegetatiebedekking te monitoren (Haga et al., 2007). Time lapse-camera's bieden een methode om veranderingen in substraatpatronen op een kleiner oppervlak (enkele meters) hoogfrequent vast te leggen en daarmee de kloof tussen menselijke observatie (fijn detail, lage ruimtelijke omvang, matige temporele frequentie) en remote sensing met een vliegend platform (grof detail, hoge ruimtelijke omvang, lage temporele frequentie) te overbruggen (Buckley et al., 2017). Voor de technieken die gebruikmaken van beelden geldt wel dat het water relatief helder en niet te ondiep moet zijn.

5 Fysische chemie

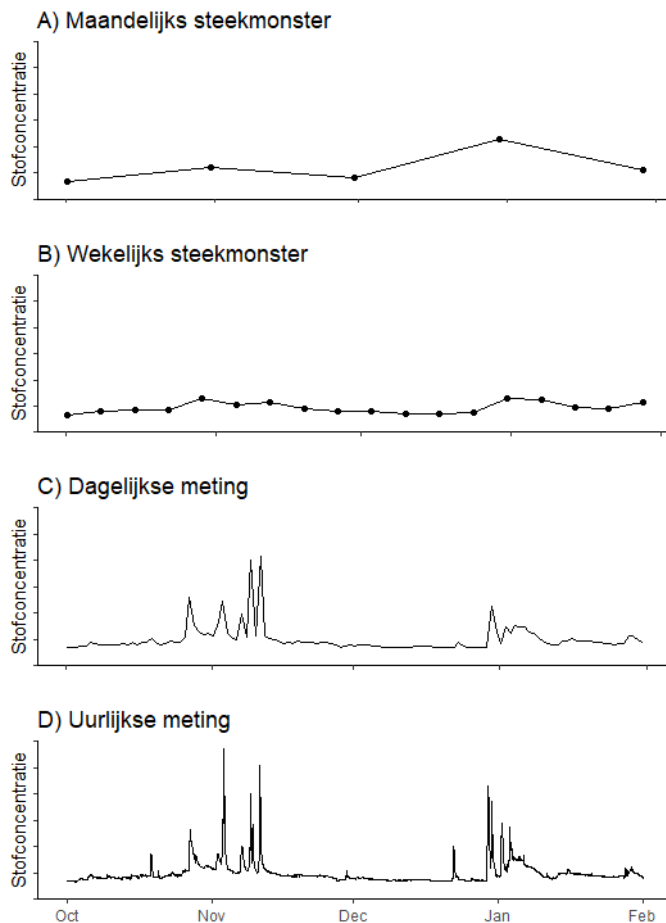
Onder fysische en chemische factoren (stoffen) vallen o.a. de zuurgraad van het water en de concentraties macro-ionen, zuurstof, organische verbindingen, nutriënten, toxicanten en de watertemperatuur. Naast interne processen in een waterlichaam worden de fysisch-chemische condities voor een belangrijk deel bepaald door de hydrologie van het omliggende landschap. Stoffen bereiken een waterlichaam direct via neerslag en indirect via oppervlakkige afstroming en het grondwater. Vervolgens worden ze getransporteerd en/of omgezet door fysische, chemische en biologische processen. Stofgehalten zijn vaak sterk gewijzigd in waterlichamen door overmatige aanvoer van stoffen door menselijke activiteiten, zoals landbouw, rioolwaterzuivering en overstorten (Verdonschot et al., 1995). Maatregelen om stofgehalten te verbeteren, kunnen ingrijpen op de bron, de mobilisatie, het transport en de routes waarlangs stoffen worden getransporteerd (Verdonschot & Verdonschot, 2020b).

5.1 Behoeftte om op te schalen in ruimte en tijd

Met de gangbare monitoringspraktijk voor het meten van fysisch-chemische parameters wordt veelal maandelijks op een aantal plekken een steekmonster van het water wordt genomen. Pieken in stofgehalten treden echter incidenteel in tijd op, afhankelijk van bijvoorbeeld neerslag, en variëren ook over de seizoenen, van dag tot dag en zelfs binnen dagen door de dag-nachtcycli in licht en temperatuur (Wade et al., 2012; Rode et al., 2016). Een eenmalige overschrijding van de tolerantiegrenzen van organismen kan ervoor zorgen dat deze op een locatie verdwijnen. Voor zuurstof treden deze knelpunten bijvoorbeeld 's nachts of in de vroege ochtend op en worden dus niet later op de dag waargenomen, zoals een voorbeeld in Figuur 7 voor laagveensloten laat zien (Van der Lee et al., 2021). Met maandelijkse metingen zijn deze momenten echter moeilijk te vangen (Kirchner et al., 2004; Skarbøvik & Roseth, 2015; Brack et al., 2016; Rode et al., 2016). Door stoffen minimaal ieder uur te meten kunnen niet alleen de overschrijdingen in stofgehalten volledig in beeld worden gebracht, maar kan ook inzicht worden verkregen in de onderliggende processen die van invloed zijn op stofgehalten (Wade et al., 2012; Rode et al., 2016; Yu et al., 2021). Stofgehalten variëren niet alleen in de tijd, maar ook in de ruimte. Deze ruimtelijke variatie is bijvoorbeeld het gevolg van het landgebruik, dat vaak sterk versnipperd is, en door de aanwezigheid van puntbronnen op bepaalde locaties. Een grotere ruimtelijke dekking is nodig om bronnen en routes van stoffen te bepalen (Mouri et al., 2011). Daarnaast speelt voor toxicanten dat ze niet alleen in het water zitten, maar ook zijn opgeslagen in de bodem (Wieringa et al., 2022).



Figuur 7 Zuurstofhuishouding in drie laagveensloten (KRW-watertype M1a) langs een eutrofiëringsgradiënt: A) mesotroof, B) eutroof en C) hypertroof (Van der Lee et al., 2021). De zuurstofverzadiging is gekleurd op basis van het kwaliteitsoordeel op de KRW-maatlat. Het tijdsblok waarin veldmedewerkers standaard een zuurstofmeting doen, is aangegeven met grijze balken. De metingen zijn op 10 cm diepte in de zomer genomen met HOBO U26 zuurstoffloggers van Onset (02/09/2016-03/09/2016).



Figuur 8 Voorbeeld van hoe stofconcentratie metingen kunnen verschillen wanneer de bemonsteringsfrequentie is aangepast van een a) maand, b) week, c) dag en d) uur.

5.2 Opties voor nieuwe meettechnieken

Door middel van dataloggers met geïntegreerde sensoren is het mogelijk om een aantal fysisch-chemische parameters hoogfrequent in de tijd te meten, zoals watertemperatuur, zuurstofgehalte, pH, geleidbaarheid en troebelheid (turbiditeit) (Van der Lee et al., 2021). Glasvezelkabels kunnen worden ingezet om ook een ruimtelijke component aan dit type metingen toe te voegen, maar dit is een vrij kostbare aangelegenheid (Kaandorp et al., 2017). Daarnaast kunnen watertemperatuur, troebelheid en opgeloste organische koolstof met remote sensing zowel in de ruimte en tijd worden gemonitord (Torgersen et al., 2001; Gilvear et al., 2016; Roni et al., 2019; Kuhn et al., 2021). De ontwikkeling om betrouwbaar en nauwkeurig hoogfrequent nutriënten in het water te meten, is ingewikkelder. Inmiddels is er praktijkervaring opgedaan om nitraat hoogfrequent te meten met UV-nitraatsensoren (Van Herpen et al., 2022). Hieruit blijkt dat het meten van nitraat met sensoren mogelijk is, maar nog veel onderhoud vereist en een kostbare aangelegenheid is. Naast het gebruik van sensoren op een voerbootje kan de inzet van routings met indicatorpapiertjes mogelijk op een snelle en goedkope wijze inzicht geven in de ruimtelijke variatie van nitraatconcentraties in een gebied, maar dit zal meerdere malen per jaar moeten worden uitgevoerd om temporele dekking te verkrijgen (Deltafact Handreiking gebiedsgerichte monitoring nutriëntenverliezen vanuit de landbouw). Het hoogfrequent meten van fosfaat is op dit moment beperkt tot nat-chemische apparaten die groot en duur zijn. Er wordt echter gewerkt aan een ontwikkeling om met 'Biosensing by Particle Motion' fosfaat en ook microverontreinigingen hoogfrequent te meten (STOWA WaterMonitor-project). Tot die tijd kunnen troebelheid- en geleidbaarheidssensoren mogelijk worden ingezet als proxy voor moeilijk te meten parameters, zoals respectievelijk fosfaat en nitraat (Horsburgh et al., 2010). Voor toxicanten is de combinatie van tijd geïntegreerde passieve sampling en bioassays geschikt om temporele en ruimtelijke variatie in potentiële ecotoxicologische risico's aan te tonen in zowel het water als de bodem (Brack et al., 2016; Boonstra in review, Deltafact *Wat zijn bioassays en wat kan ik ermee?*).

6 Biologie

Soorten en levensgemeenschappen, waaronder de veel als biologisch kwaliteitselement gebruikte groepen algen, planten, macrofauna en vissen, reageren op de omstandigheden in een waterlichaam (Verdonschot et al., 1995). Niet alle soorten komen overal voor. Het voorkomen/afwezig zijn van soorten is een resultante van ongunstige waarden van milieufactoren maal de 'gevoeligheid' van de organismen over de gehele levenscyclus (Verdonschot & Van der Lee, 2020). Elke soort heeft daarmee zijn eigen toleranties voor verschillende milieufactoren, zoals een specifieke range in stroomsnelheid, voedselrijkdom en temperatuur. Deze toleranties kunnen worden gebruikt om het milieu waar de betreffende soorten of levensgemeenschappen zijn aangetroffen, te duiden (Verdonschot & Verdonschot, 2021). Herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten worden over het algemeen uitgevoerd ten behoeve van het versterken van populaties van bepaalde indicatieve soorten of van complete levensgemeenschappen.

6.1 Behoeftte om op te schalen in ruimte en tijd

In de huidige monitoring worden levensgemeenschappen op één of enkele plekken in een waterlichaam bemonsterd, waarbij ervan uit wordt gegaan dat deze bemonstering representatief is voor het gehele waterlichaam. De gedachte hierbij is dat milieufactoren op een relatief grote landschappelijke schaal invloed uitoefenen op het systeem en daardoor terug te zien zijn op iedere willekeurige plek in een waterlichaam. Deze aanname is echter sterk context-afhankelijk (Van der Lee et al., 2022b). Lokale factoren kunnen immers een effect uitoefenen op een traject of gedeelte binnen een waterlichaam, te denken valt bijvoorbeeld aan intensief bemeste percelen versus bospercelen of de aanwezigheid van overstorten (Van der Lee et al., 2022c). Dit maakt de keuze van de ligging van de monsterpunten sterk bepalend voor het beeld dat wordt gevormd van een systeem. Om deze ruimtelijke variatie te detecteren, is vaak een grotere dekking van monsterpunten binnen een waterlichaam nodig (Van der Lee et al., 2022b).

Voor het monitoren van soorten speelt de temporele dynamiek iets minder sterk dan voor stromen, stoffen en structuren, omdat het voorkomen van soorten een resultante is van een langere periode. De duur van de periode waarop milieufactoren effect hebben op het voorkomen van organismen, hangt daarentegen sterk af van de levenscyclus van de soort, welke varieert van enkele dagen (algen) tot meerdere jaren (vissen) (Figuur 9). Het is van belang dat de meetintensiteit in de pas loopt met de levenscycli van de te onderzoeken organismegroepen. Bij het monitoren van herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten arriveren vaak eerst algemene en toevallige soorten, terwijl de doelgemeenschap jaren nodig heeft om zich te ontwikkelen. Er is gemiddeld minimaal een periode van 15 tot 25 jaar nodig om de oorspronkelijke biodiversiteit te bereiken, hoewel verschillen tussen locaties groot kunnen zijn (Verdonschot & Verdonschot, 2021). Tussentijdse monitoring en evaluatie van de biologische respons is belangrijk om het project waar nodig bij te sturen. Om deze ruimtelijke en temporele opschaling te bereiken met een gelijkblijvend monitoringsbudget, zijn goedkope en snel uitvoerbare methoden voor het bepalen van de levensgemeenschap bij maatregel-effect-monitoring noodzakelijk.

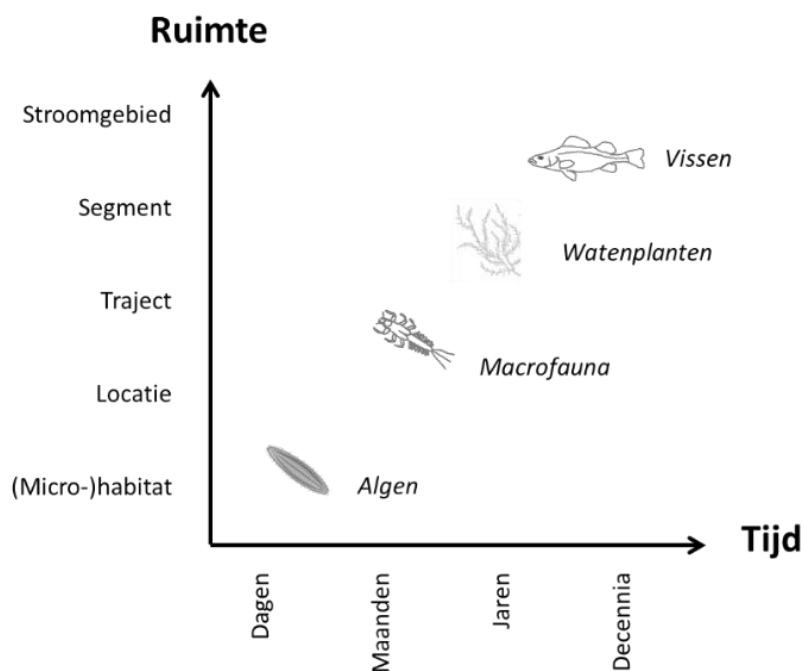
6.2 Opties voor nieuwe meettechnieken

Het opschalen van biologische monitoring kan worden bereikt door quickscan-methodes in te zetten. Door de levensgemeenschap met minder taxonomisch detail te duiden kan snel een uitspraak worden gedaan over de globale toestand en belangrijkste stressoren. Vervolgonderzoek is daarna noodzakelijk om de exacte relaties vast te stellen. Voor macrofauna is bijvoorbeeld een quickscan-methode ontwikkeld voor sloten (Keizer-Vlek et al., 2013) en beken (Verdonschot & Verdonschot 2019, 2020ab), waarbij kleinere monsters worden genomen ten opzichte van de standaard KRW-bemonstering en deze worden gedetermineerd tot 'op het oog' zichtbare taxonomische eenheden. Aanzetten voor quickscan-methodes zijn ook voorgesteld voor

macrofyten, zie bijvoorbeeld de Biotoets met vijftien plantensoorten (Weeda, 2011). Voor algen kunnen schattingen van de fytoplankton (o.b.v. chlorofyl-a) en cyanobacterie (o.b.v. phycocyanin) biomassa een quickscan-beeld geven van de ecologische toestand. Hoogfrequente metingen zijn mogelijk met sensoren in het water, en ontwikkelingen in de remote sensing maken het mogelijk om hier een ruimtelijke component aan toe te voegen (Dörnhöfer & Oppelt, 2016; Bresciani et al., 2020; Free et al., 2021). Nadeel van deze quickscan-methodes is dat het gebruik van minder taxonomische detail minder zeggingskracht heeft over de specifieke onderliggende factoren die bepalen of soorten wel of niet voor kunnen komen, waardoor een gedetailleerde diagnose niet mogelijk is (Van der Lee et al., 2022b).

Ontwikkelingen in moleculaire technieken, met name DNA-metabarcoding, kunnen mogelijk een oplossing bieden om de aanwezigheid van soorten vast te stellen zonder dat hiervoor op de klassieke manier (op basis van morfologische kenmerken) gedetermineerd hoeft te worden (Deltafact DNA-technieken voor waterbeheerders; Blancher et al., 2022). Deze techniek kan worden toegepast op de biologische monsters die in het waterbeheer verzameld worden en zou een flinke tijdsbesparing kunnen opleveren, omdat de determinatiestap in de monitoringscyclus achterwege kan blijven (Beentjes et al., 2018; Duarte et al., 2020; Hootsmans, 2020; Gleason et al., 2021). Ook jonge, niet-geslachtsrijpe of kapotte exemplaren die niet op basis van uiterlijke kenmerken kunnen worden gedetermineerd, kunnen met DNA-metabarcoding wel tot op soort worden gebracht (Pawlowski et al., 2018). In sommige gevallen, bijvoorbeeld voor vis, is het ook mogelijk een watermonster te nemen en daaruit af te leiden welke soorten er voorkomen (op basis van het door de organismen losgelaten DNA in het water: eDNA) (Pont et al., 2021). Voor macrofauna lijkt DNA van een gesorteerd netmonster echter een veel completer beeld te geven van de lokale soortgemeenschap dan een eDNA watermonster (Gleason et al., 2021).

Om naast de aanwezigheid van soorten ook inzicht te krijgen in de beweging en het gebruik van habitat in ruimte en tijd kunnen grotere organismen, zoals vis, worden voorzien van een zender en gevolgd worden met telemetriesystemen (Roni et al., 2019).



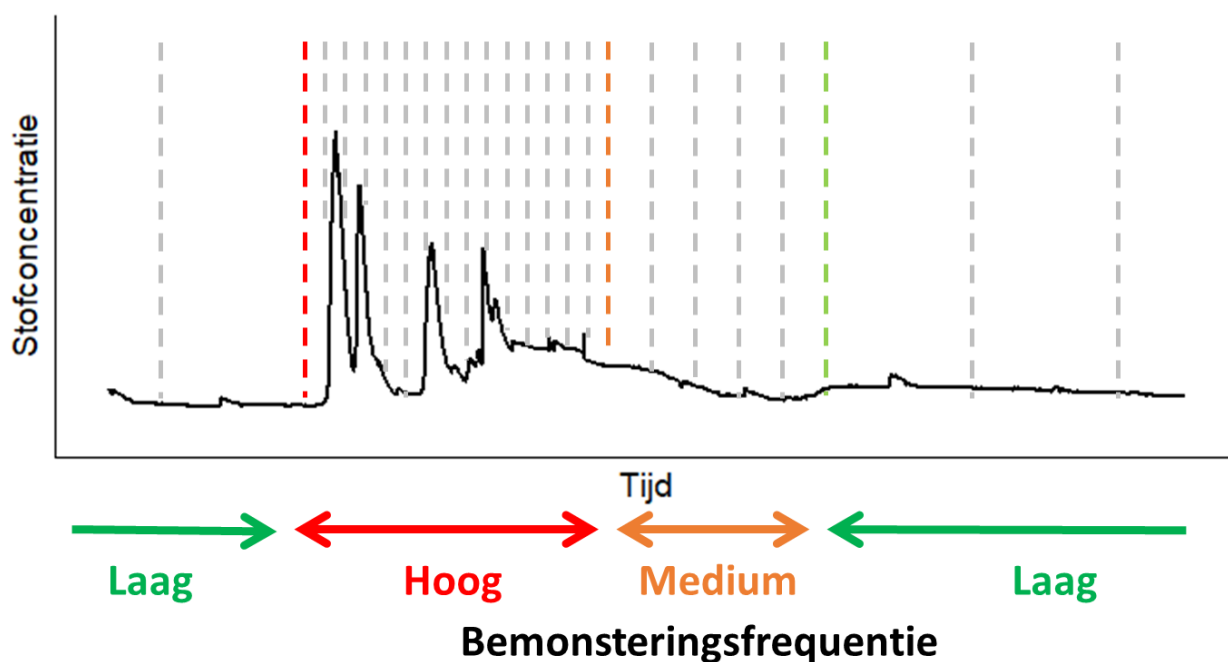
Figuur 9 Ruimtelijke en temporele schaal waarop verschillende organismegroepen functioneren.

7 Aanbevelingen bij de implementatie van nieuwe meettechnieken

Hoewel de nieuwe technieken veelbelovend zijn om de maatregel-effect-monitoring op te schalen in ruimte en tijd, zijn er enkele algemeen geldende uitdagingen bij de implementatie van deze technieken in monitoringsprogramma's. Hieronder volgen aanbevelingen om de implementatie van nieuwe meettechnieken in goede banen te leiden.

1. Ontwikkeling van een richtlijn voor beste praktijktoepassingen

Doordat de meettechnieken nieuw zijn, bestaan er vaak nog geen meetstandaarden en werkprotocollen met betrekking tot hoe de technieken toe te passen en onder welke omstandigheden. Niet iedere meettechniek werkt goed op iedere plek (Marcus et al., 2012; Van Herpen et al., 2022). Voor sensoren zijn bijvoorbeeld verschillende typen apparatuur beschikbaar die verschillen in het meetbereik, maar ook verschillende keuzes voor energievoorziening, behuizing en schoonmaak (Van Herpen et al., 2022). Vergelijkbaar zijn voor remote sensing veel soorten data en producten beschikbaar, die o.a. verschillen in temporele, ruimtelijke en spectrale resolutie (Weijninger et al., 2016). Ook voor het gebruik van moleculaire technieken geldt bijvoorbeeld dat er verschillende methoden zijn m.b.t. het conserveren en isoleren van DNA, maar ook de keuze van barcodes en primers (Pawlowski et al., 2018; Blancher et al., 2022). Er moeten daarom richtlijnen worden ontwikkeld voor verschillende onderzoeksvragen en situaties, zodat de meettechnieken kunnen worden ingezet die het best passen bij het meetdoel en het best werken onder de omstandigheden waar wordt gemeten. Om de inzet van kostbare meetapparatuur te beperken, kan de bemonsteringsfrequentie worden aangepast aan het moment dat er ecologisch relevante waarden zijn in het betreffende waterlichaam (Blaen et al., 2016, Figuur 10). Het is belangrijk dat deze richtlijn adaptief is en regelmatig wordt aangevuld of vernieuwd, omdat de ontwikkeling van meettechnieken continu doorgaat.



Figuur 10 Adaptieve monitoring waarbij de bemonsteringsfrequentie wordt aangepast aan het moment dat de betreffende parameter (bijv. stofconcentratie) ecologisch relevante waarden heeft in het betreffende water (aangepast naar Blaen et al., 2016).

2. Organiseren van onderhoud aan meetopstellingen

Veel van de nieuwe meettechnieken bestaan uit meetopstellingen die gedurende langere tijd in het veld staan. Door realtime datastroom van sensor naar database zijn problemen met de meetopstelling sneller te detecteren en op te lossen. Met name aangroei kan de nauwkeurigheid van sensoren beperken. Geautomatiseerde reiniging met wissers of perslucht is mogelijk, maar ook daar blijft handmatig schoonmaken en onderhoud nodig (Rode et al., 2016; Van Herpen et al., 2022). Het is van belang om periodiek onderhoud aan de meetopstelling door getraind personeel te organiseren, zoals technische controles, reiniging en kalibratie.

3. Beschermen van meetopstellingen tegen vandalisme, diefstal, ongelukken etc.

Bij het plaatsen van een meetopstelling in het veld is er risico op vandalisme en diefstal en ongelukken bij bijvoorbeeld maaiwerkzaamheden etc. Als de meetopstelling in het water staat, is er tevens risico op drijfvuil, zoals slib, takken, blad en vegetatie. Er dienen meetopstellingen te worden ontwikkeld die bescherming bieden tegen deze risico's, zoals verschillende vormen van behuizing (Van Herpen et al., 2022).

4. Verwerking 'grote' datastromen

Met het opschalen van de metingen in ruimte en tijd worden ook 'grote' datastromen gegenereerd die moeten worden opgeslagen en verwerkt (O'Grady et al., 2021). Dataverwerking achteraf bij sensoren is bijvoorbeeld nodig voor het wegfilteren van ruis, het detecteren van afwijkende meetwaarden (vervuiling, verstoring, extreme weersomstandigheden) en het compenseren van 'drift' (Wagner et al., 2006; Horsburgh et al., 2015; Van Herpen et al., 2022). Bij remote sensing is bewolking een veelvoorkomend 'probleem' in Nederland (Weijninger et al., 2016). Er is behoefte aan de ontwikkeling van geautomatiseerde tools en standaarden voor het verwerken van de data, gegenereerd met nieuwe meettechnieken (Rode et al., 2016). Daarnaast is het van belang om zowel de ruwe, verwerkte en metadata op te slaan, bij voorkeur in een gedeeld platform (Keck et al., 2017).

5. Vergelijking met huidige methoden

Een essentieel onderdeel van goede data-opbrengst met nieuwe meettechnieken is de vergelijking en interkalibratie met de huidige technieken, bijvoorbeeld sensordata en remote sensing versus in-situmetingen of steekmonsters (Weijninger et al., 2016; Van Herpen et al., 2022) en de inzet van moleculaire technieken om soorten op naam te brengen versus identificatie op basis van morfologische determinatie (Blancher et al., 2022). Deze vergelijking dient over een grote ruimtelijke dekking en over een voldoende lange tijdsperiode plaats te vinden.

6. Interpretatie van de gegevens

Een van de grootste uitdagingen bij de implementatie van nieuwe meettechnieken ligt in de vertaling van de gegenereerde gegevens naar een beoordeling en diagnose van de ecologische toestand. De gegevens zijn bijvoorbeeld niet een-op-een inpasbaar op de huidige maatlatten voor de ecologische kwaliteitsbeoordeling via de KRW. Ook wordt door de opschaling in ruimte en tijd veel meer informatie gegenereerd over het functioneren van ecosystemen. Het behoeft aanvullend onderzoek om te begrijpen hoe deze gegevens kunnen worden geïnterpreteerd om uit te zoeken welke mechanismen uiteindelijk bepalend zijn voor de levensgemeenschap in een waterlichaam. Om tot een juiste diagnose te komen, is het tevens van belang om de verspreiding van organismen mee te nemen (Verdonschot & Verdonschot, 2021). Er wordt aanbevolen om prioriteit te geven aan de vertaling van de gegenereerde gegevens naar ecologische interpretaties, zodat kan worden geleerd van de bemeten uitgevoerde herstel-, (her)inrichtings- of beheerprojecten.

Literatuur

- Beentjes, K.K., Speksnijder, A.G.C.L., Schilthuizen, M., Schaub, B.E.M., van der Hoorn, B.B. 2018. The influence of macroinvertebrate abundance on the assessment of freshwater quality in The Netherlands. *Metabarcoding and Metagenomics* 2:e26744.
- Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A. D., Gurnell, A. M., Mosselman, E. 2015. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental Earth Sciences*, 73(5), 2079-2100.
- Blaas, M. Penning E, Eleveld M, Dionisio Pires M, Blauw A (2016) Waterkwaliteitsbeheer – Remote sensing komt steeds meer binnen bereik. H2O online 1612-06.
- Blaen, P. J., Khamis, K., Lloyd, C. E., Bradley, C., Hannah, D., & Krause, S. (2016). Realtime monitoring of nutrients and dissolved organic matter in rivers: Capturing event dynamics, technological opportunities and future directions. *Science of the Total Environment*, 569, 647-660.
- Blancher, P., Lefrançois, E., Rimet, F., Vasselon, V., Argillier, C., Arle, J., ... Bouchez, A. 2022. A strategy for successful integration of DNA-based methods in aquatic monitoring.
- Boonstra, H., de Baat, M. L., van der Meer, F., Roessink, I., Kraak, M. H. S. (in review). Temporal Variation of Ecotoxicological Risks in Agricultural Waterbodies. Available at SSRN 4204476.
- Boothroyd, R. J., Nones, M., Guerrero, M. 2021. Deriving planform morphology and vegetation coverage from remote sensing to support river management applications. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 657354.
- Brack, W., Ait-Aissa, S., Burgess, R. M., Busch, W., Creusot, N., Di Paolo, C., ... Krauss, M. 2016. Effect-directed analysis supporting monitoring of aquatic environments—an in-depth overview. *Science of the Total Environment*, 544, 1073-1118.
- Bresciani, M., Pinardi, M., Free, G., Luciani, G., Ghebrehiwot, S., Laanen, M., ... Giardino, C. 2020. The use of multisource optical sensors to study phytoplankton spatio-temporal variation in a Shallow Turbid Lake. *Water*, 12(1), 284.
- Dafforn, K. A., Johnston, E. L., Ferguson, A., Humphrey, C. L., Monk, W., Nichols, S. J., ... Baird, D. J. 2015. Big data opportunities and challenges for assessing multiple stressors across scales in aquatic ecosystems. *Marine and Freshwater Research*, 67(4), 393-413.
- De Brouwer, J. H. F. 2020. Spatiotemporal heterogeneity in lowland streams: A benthic macroinvertebrate perspective. PhD thesis, University of Amsterdam.
- Dörnhöfer, K., Oppelt, N. 2016. Remote sensing for lake research and monitoring—Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105-122.
- dos Reis Oliveira, P. C., van der Geest, H. G., Kraak, M. H., Westveer, J. J., Verdonschot, R. C., Verdonschot, P. F. 2020. Over forty years of lowland stream restoration: Lessons learned? *Journal of environmental management*, 264, 110417.
- Duarte, S., Leite, B. R., Feio, M. J., Costa, F. O., Filipe, A. F. 2021. Integration of DNA-based approaches in aquatic ecological assessment using benthic macroinvertebrates. *Water*, 13(3), 331.
- Eltner, A., Sardemann, H., Grundmann, J. (2020). Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and unmanned-aerial-vehicle imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1429-1445.
- Eltner, A., Bertalan, L., Grundmann, J., Perks, M. T., Lotsari, E. 2021. Hydro-morphological mapping of river reaches using videos captured with UAS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(14), 2773-2787.
- Free, G., Bresciani, M., Pinardi, M., Giardino, C., Alikas, K., Kangro, K., ... Peters, S. 2021. Detecting climate driven changes in chlorophyll-a using high frequency monitoring: the impact of the 2019 European Heatwave in Three Contrasting Aquatic Systems. *Sensors*, 21(18), 6242.
- Frissell, C. A., Liss, W. J., Warren, C. E., Hurley, M. D. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental management*, 10(2), 199-214.
- Gilvear, D. J., Hunter, P., Stewardson, M., Greenwood, M. T., Thoms, M. C., Wood, P. J. 2016. Remote sensing: mapping natural and managed river corridors from the micro to the network scale. *River science: Research and management for the 21st century*, 171-196.

- Gleason, J. E., Elbrecht, V., Braukmann, T. W., Hanner, R. H., & Cottenie, K. (2021). Assessment of stream macroinvertebrate communities with eDNA is not congruent with tissue-based metabarcoding. *Molecular Ecology*, 30(13), 3239-3251.
- Gubbels, R. E. M. B. 2007. De beekprik in de Rode beek en de Bosbeek. *Natuurhistorisch Maandblad*, 96(6), 145-148.
- Haga, H., Ohtsuka, T., Matsuda, M., Ashiya, M. 2007. Echosounding observations of coverage, height, PVI, and biomass of submerged macrophytes in the southern basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology*, 8(2), 95-102.
- Hootsmans, M. 2020. DNA Diatom Biosensor. <https://www.tkiwatertechnologie.nl/projecten/dna-diatom-biosensor/>.
- Horsburgh, J. S., Jones, A. S., Stevens, D. K., Tarboton, D. G., Mesner, N. O. 2010. A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates. *Environmental Modelling & Software*, 25(9), 1031-1044.
- Horsburgh, J. S., Reeder, S. L., Jones, A. S., Meline, J. 2015. Open source software for visualization and quality control of continuous hydrologic and water quality sensor data. *Environmental Modelling & Software*, 70, 32-44.
- Kaandorp, V., De Louw, P., Doornenbal, P. 2017. Monitoring met glasvezelkabels in beken laat lokale effecten en heterogeniteit in watertemperatuur zien. *Water Matters* 2, 36-39.
- Keck, F., Vasselon, V., Tapolczai, K., Rimet, F., Bouchez, A. 2017. Freshwater biomonitoring in the Information Age. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(5), 266-274.
- Keizer-Vlek, H. E., Verdonschot, P. F., Verdonschot, R. C., Goedhart, P. W. 2012. Quantifying spatial and temporal variability of macroinvertebrate metrics. *Ecological Indicators*, 23, 384-393
- Keizer-Vlek, H., Gylstra, R., Verdonschot, R., Verdonschot P. 2013. KRW QuickScan macrofauna 'overige wateren'. H2O-online.
- Kemmers, R. H., Gieske, J. M. J., Veen, P., Zonneveld, L. M. L. 1995. Standaard meetprotocol verdroging; voorlopige richtlijnen voor monitoring van anti-verdrogingsprojecten (No. 15.1). Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging.
- Kirchner, J. W., Feng, X., Neal, C., Robson, A. J. 2004. The fine structure of water-quality dynamics: The (high-frequency) wave of the future. *Hydrological processes*, 18(7), 1353-1359.
- Kuhn, J., Casas-Mulet, R., Pander, J., Geist, J. 2021. Assessing stream thermal heterogeneity and cold-water patches from UAV-based imagery: A matter of classification methods and metrics. *Remote Sensing*, 13(7), 1379.
- Lepori, F., Palm, D., Brännäs, E., Malmqvist, B. 2005. Does restoration of structural heterogeneity in streams enhance fish and macroinvertebrate diversity?. *Ecological applications* 15: 2060-2071.
- Lewis, C. A., Lester, N. P., Bradshaw, A. D., Fitzgibbon, J. E., Fuller, K., Hakanson, L., Richards, C. 1996. Considerations of scale in habitat conservation and restoration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 440-445.
- Marcus, W. A., Fonstad, M. A., Legleiter, C. J. 2012. Management applications of optical remote sensing in the active river channel. *Fluvial remote sensing for science and management*, 1.
- Minns, C. K. (1995). Allometry of home range size in lake and river fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52: 1499-1508.
- Mouri, G., Takizawa, S., Oki, T. 2011. Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. *Journal of Environmental Management*, 92(7), 1837-1848.
- Nones, M. 2021. Remote sensing and GIS techniques to monitor morphological changes along the middle-lower Vistula river, Poland. *International Journal of River Basin Management*, 19(3), 345-357.
- O'Grady, J., Zhang, D., O'Connor, N., & Regan, F. (2021). A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies. *Science of The Total Environment*, 765, 142766.
- Pawlowski, J., Kelly-Quinn, M., Altermatt, F., Apothéloz-Perret-Gentil, L., Beja, P., Boggero, A., ... Kahlert, M. (2018). The future of biotic indices in the ecogenomic era: Integrating (e) DNA metabarcoding in biological assessment of aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 637, 1295-1310.
- Penning, E., Berends, K. Verdonschot, R. C. M., Van Slobbe, E., Fraaije, R. Augustijn D. 2020. Peilen en vegetatie stromende wateren. Deltafact STOWA.
- Poff, N. L., Ward, J. V. 1990. Physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatiotemporal heterogeneity. *Environmental management*, 14(5), 629-645.

- Pont, D., Valentini, A., Rocle, M., Maire, A., Delaigue, O., Jean, P., Dejean, T. 2021. The future of fish-based ecological assessment of European rivers: from traditional EU Water Framework Directive compliant methods to eDNA metabarcoding-based approaches. *Journal of Fish Biology*, 98(2), 354-366.
- Rode, M., Wade, A. J., Cohen, M. J., Hensley, R. T., Bowes, M. J., Kirchner, J. W., ... Jomaa, S. 2016. Sensors in the stream: the high-frequency wave of the present.
- Roni, P., Hall, J. E., Drenner, S. M., Arterburn, D. 2019. Monitoring the effectiveness of floodplain habitat restoration: A review of methods and recommendations for future monitoring. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(4), e1355.
- Santos, M. J., Khanna, S., Hestir, E. L., Andrew, M. E., Rajapakse, S. S., Greenberg, J. A., ... Ustin, S. L. 2009. Use of hyperspectral remote sensing to evaluate efficacy of aquatic plant management. *Invasive Plant Science and Management*, 2(3), 216-229.
- Skarbøvik, E., Roseth, R. 2015. Use of sensor data for turbidity, pH and conductivity as an alternative to conventional water quality monitoring in four Norwegian case studies. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(1), 63-73.
- Smokorowski, K. E., Randall, R. G. 2017. Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs. *Facets*, 2(1), 212-232.
- Stewart-Oaten, A., Murdoch, W. W., Parker, K. R. 1986. Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time?. *Ecology*, 67(4), 929-940.
- Thomaz, S. M., Cunha, E. R. D. 2010. The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia* 22: 218-236.
- Van den Berg, S. De Baat, M., Dingemans, M., Pronk, T., Posthuma, L. 2022. Wat zijn bioassays en wat kan ik ermee? Deltafact STOWA.
- Van der Hoorn, B. Beentjes, K. 2020. Genetische biomonitoring van macrofauna. H2O online.
- Van der Lee, G. H., Bakker, A. M., Verdonschot, R. C. M., Verdonschot, P. F. M. 2022c. Doorwerking van lokaal beekherstel op de ecologische kwaliteit van het hele stroomgebied: een verkennende analyse van vier stroomgebieden op basis van de macrofauna.
- Van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C. M., Verdonschot, P. F. M. 2021. Hoe kan continue monitoring de ecologische doelen dichterbij brengen? H2O Water Matters 1, 40-43.
- Van der Lee, G. H., Verdonschot, R. C. M., Verdonschot, P. F. M. 2020. Factsheet KIWK: habitatheterogeniteit. Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research.
- Van der Lee, G., Bakker, A., Verdonschot, R., Verdonschot, P. 2022a. Maatregel-effect-monitoring in oppervlaktewateren: ontwerp, analyse en bepaling van de ecologische effectiviteit van uitgevoerde maatregelen (No. 2022-25). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Van der Lee, G., Verdonschot, R. C., Verdonschot, P. F. 2022b. Advies voor het monitoren van de ecologische waterkwaliteit (No. 2021-22). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Van Herpen, F. Van Aarle, N., Rozemeijer, J., Hooijboer, A., Oudenhoven, J. 2022. Praktijkervaringen met nitraatsensoren in oppervlaktewater. H2O online.
- Van Noord, A., de Vries, J., Verdonschot, P.F.M., Verdonschot, R.C.M. 2022. Effectiviteit van enkelvoudige maatregelen: Evaluatie van gedocumenteerde herstelprojecten in Nederland van 2008 t/m 2019. Notitie Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK), Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.
- Verdonschot P. F. M. et al. (red.) 1995. Beken stromen. Leidraad voor ecologisch beekherstel. Werkgroep Ecologisch Waterbeheer, subgroep Beekherstel, WEW-06. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Verdonschot, P. F. M., Verdonschot, R. C. M. 2020b. Factsheet KIWK: fosforbelasting. Wageningen Environmental Research, Zoetwaterecosystemen.
- Verdonschot, P. F. M., Verdonschot, R. C. M. 2021. Tijdvertraging (time-lags) in regionale wateren. Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research.
- Verdonschot, P. F., Verdonschot, R. C. 2020a. Factsheet KIWK: Stroming en waterbeweging. Wageningen Environmental Research, Zoetwaterecosystemen.
- Verdonschot, P. F., Verdonschot, R. C. 2021. Indicatiewaarden van aquatische organismen (No. KIWK 2021-53). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Verdonschot, P. F.M, van der Lee, G. H. 2020. Perspectives on the functional assessment of multi-stressed stream ecosystems. *Freshwater Science*, 39(4), 605-620.

-
- Verdonschot, R. C. M. 2020a. Quickscan knelpuntenanalyse macrofauna Snelle Loop traject Grotelsche heide – Aa monding juli 2020. Notitie Zoetwatersystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.
- Verdonschot, R. C. M. 2020b. Quickscan knelpuntenanalyse macrofauna Peelse loop traject Reijseweg – Aa monding juni 2020. Notitie Zoetwatersystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen.
- Verdonschot, R. C. M., Maas, G. J., Penning, E. 2020. Monitoringstrategieën voor het meten van de effectiviteit van beekherstelprojecten. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Wade, A. J., Palmer-Felgate, E. J., Halliday, S. J., Skeffington, R. A., Loewenthal, M., Jarvie, H. P., ... Newman, J. R. 2012. Hydrochemical processes in lowland rivers: insights from in situ, high-resolution monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4323-4342.
- Wagner, R. J., Boulger Jr, R. W., Oblinger, C. J., Smith, B. A. 2006. Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors: station operation, record computation, and data reporting (No. 1-D3).
- Weeda, E. J. 2011. Waterplanten als maat voor de biologische kwaliteit van oppervlaktewateren. Biotoets met 15 plantensoorten in de Noordlike Fryske Wâlden. Alterra.
- Weijniger, W., Jacobs, C., Eleveld, M. Pires, M. D., Blaas, M. 2016. Remote sensing waterkwantiteits- en waterkwaliteitsbeheer. Deltafact STOWA.
- Wieringa, N., van der Lee, G. H., de Baat, M. L., Kraak, M. H. S., Verdonschot, P. F. M. 2022. Contribution of sediment contamination to multi-stress in lowland waters. *Science of the Total Environment*, 844, 157045.
- Yu, L., Rozemeijer, J. C., Broers, H. P., Van Breukelen, B. M., Middelburg, J. J., Ouboter, M., Van Der Velde, Y. 2021. Drivers of nitrogen and phosphorus dynamics in a groundwater-fed urban catchment revealed by high-frequency monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 69-87.

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3250
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3250
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

