



Indicatoren voor herstel grondwaterinvloed in beken

Verkenning van geschikte biologische indicatoren voor hydrologisch herstel

Jip de Vries, Tom van der Meer, Ralf Verdonshot



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Indicatoren voor herstel grondwaterinvloed in beken

Verkenning van geschikte biologische indicatoren voor hydrologisch herstel

Jip de Vries, Tom van der Meer, Ralf Verdonschot

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksthema *Beekdalbufferzones en infiltratiegebieden als basis voor ecologisch functioneren en inrichting van beekdalsystemen* (Projectnummer 5200047366, BO-43-123 Missie 1C).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, februari 2025

Gereviewd door:

Ine Beyen, onderzoeker zoetwaterecologie (Wageningen Environmental Research)

Akkoord voor publicatie:

Karin Andeweg, teamleider van Water & Food (Wageningen Environmental Research)

Rapport 3413
ISSN 1566-7197

De Vries, J., T.V. van der Meer, R.C.M. Verdonschot, 2025. *Indicatoren voor herstel grondwaterinvloed in beken; Verkenning van geschikte biologische indicatoren voor hydrologisch herstel*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3413. 48 blz.; 19 fig.; 9 tab.; 52 ref.

In dit rapport is beschreven wat de mogelijkheden zijn om de effecten van grondwaterinvloed in (herstelde) beken in kaart te brengen, met behulp van metrics gebaseerd op beekorganismen met een indicatiewaarde. Op basis van literatuuronderzoek zijn voor de Nederlandse context potentieel te gebruiken metrics voor het indiceren van grondwateruittreding in boven- en middenlopen van beken geselecteerd. Deze metrics zijn toegepast in een veldsituatie en op monitoringsdata van Nederlandse waterschappen. Het gebruik van deze metrics is mogelijk, maar nog niet praktisch toepasbaar. Een uitbreiding van monitoring van grondwaterinvloed en preferentiedata van indicatorsoorten kan een toekomstige ontwikkeling wel verder ondersteunen.

Trefwoorden: indicator, beekdallandschap, grondwater, macrofauna, herstel

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/686557> 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.

© 2025 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 kwaliteitsmanagementsysteem volgens de ISO 9001. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3413 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Hersteld traject van de Oude Strijper Aa (Jip de Vries)

Inhoud

Verantwoording		5
Samenvatting		7
1	Introductie	9
	1.1 Grondwatergevoede ecosystemen staan onder druk	9
	1.2 Monitoring van herstelprojecten blijft achter	10
	1.3 Mogelijkheden voor monitoring van herstel van grondwaterinvloed	11
	1.4 Afbakening studiegebied	12
	1.5 Doel en vraagstelling	13
	1.6 Leeswijzer	13
2	Achtergrond functioneren beekstelsysteem	14
	2.1 Herkomst water en afvoer van beken	14
	2.2 Waarom is grondwaterinvloed in beken ecologisch relevant?	15
3	Shortlist metrics grondwateruittreding	16
	3.1 Methode	16
	3.2 Inventarisatie metrics voor grondwaterinvloed	16
	3.3 Ondersteunende soortspecifieke data	18
	3.4 Toepassing metric	21
	3.5 Outlook voor toepassing metric	21
4	Veldexperiment indicatie grondwateruittreding	23
	4.1 Introductie	23
	4.2 Studiegebied	23
	4.3 Methode	24
	4.4 Resultaten	26
5	Data-analyse metrics grondwateruittreding	32
	5.1 Introductie	32
	5.2 Methode	32
	5.2.1 Dataverzameling	32
	5.2.2 Dataverwerking	32
	5.2.3 Analyse	33
	5.3 Resultaten	33
	5.4 Toepasbaarheid van de metrics	41
	5.5 Discussie	42
6	Conclusies en aanbevelingen	43
Literatuur		45

Verantwoording

Rapport: 3413

Projectnummer: BO-43-123 - 5200047366

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 zoetwaterecologie

naam: Ine Beyen

datum: 21 januari 2025

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Karin Andeweg

datum: 27 januari 2025

Samenvatting

Beken worden in meer of mindere mate gevoed door grondwater, via bronnen of diffuse kwel. Grondwatergevoede gebieden kunnen specifieke habitats bieden waar een relatief stabiele temperatuur en afvoer heerst. Deze omstandigheden worden door bepaalde soorten macro-invertebraten geprefereerd. Op basis van preferentiedata kunnen bepaalde soorten als indicator worden gebruikt om grondwatervoeding te indiceren.

Het doel van dit onderzoek was om mogelijkheden in kaart te brengen voor het vaststellen van effecten van grondwaterinvloed in herstelde beken met behulp van *metrics*, gebaseerd op indicerende organismen in de beek. Daarvoor is er gekeken naar een shortlist van mogelijk te gebruiken op de macro-invertebraten-gemeenschap gebaseerde metrics voor het indiceren van grondwateruittrekking in boven- en middenlopen van beken, de toepassing van de metrics in een veldsituatie en de toepassing van de metrics op monitoringsdata van Nederlandse waterschappen.

Uit het overzicht van de preferentiedata van macro-invertebraten blijkt dat er een beperkt aantal Nederlandse soorten is die een grondwatergevoed habitat indiceren en waarvoor preferentiedata beschikbaar zijn. De mogelijk indicerende waarde ligt in kenmerkende eigenschappen als de preferente stromingszone, temperatuurpreferentie of (negatief indicierend) het voorkomen van vormen van droogteresistentie.

Er is in een veldsituatie gekeken naar de toepassing van grondwater indicerende metrics naast andere methoden. Met behulp van temperatuurloggers was het mogelijk om gedurende vijf weken de hoogte en de variatie van de oppervlaktewatertemperatuur vast te leggen in een sprengstelsel, gekenmerkt door sterke grondwatervoeding. Het temperatuursignaal was duidelijk afgevlakt voor locaties die onder sterke invloed stonden van grondwater. Echter, de variatie was groot, daar de temperatuur sterk beïnvloed wordt door andere milieufactoren zoals beschaduwing. Enkel temperatuurmetingen zijn dus niet voldoende om de mate van grondwaterinvloed te onderscheiden. De macrofaunagemeenschap bevatte op de helft van de locaties soorten met een preferentie voor grondwatervoeding of stabiele lage temperaturen, maar niet daar waar de invloed van grondwater het sterkst waarneembaar was. Daarmee wordt duidelijk dat voor het vaststellen van grondwaterindicatie het niet voldoende is om naar de macrofaunasamenstelling op een specifieke locatie te kijken. Daarvoor is monitoring van macrofauna en toepassing van metrics op de gemeenschappen in een grootschaliger gebied nodig. Het bekijken van de macrofaunagemeenschap en een continue temperatuurmeting kan elkaar wel aanvullen.

De toepassing van deze metrics op een grotere dataset van al dan niet grondwatergevoede systemen in Nederland liet de onderscheidende werking zien van een aantal van de kandidaatmetrics. Dit waren de volgende metrics: de preferente stromingszone (bronloopje/bovenloop), een temperatuurpreferentie tot 10°C, de focustemperatuur, het aantal taxa met grondwaterindicatie, voorkomen in zeer ondiep/bronnmilieu en de stromingspreferentie. Echter, het is aan te bevelen om de toepasbaarheid van metrics verder te toetsen met een uitgebreidere dataset van Nederlandse oppervlaktewateren waarbij de mate van grondwatervoeding op een gelijkwaardige en reproduceerbare manier is geclassificeerd.

1 Introductie

1.1 Grondwatergevoede ecosystemen staan onder druk

Grondwatergevoede ecosystemen komen in beekdalén zowel in een aquatische als een terrestrische context voor. Voorbeelden van de eerste categorie zijn bronnen, beken en meertjes (vennen, poelen, vijvers); de tweede categorie omvat onder andere veenvormende zeggenvegetaties en broekbossen (Figuur 1.1; Klove, 2011). Grondwater uit een watervoerende laag (*aquifer*) kan over een groot oppervlak in het beekdal diffuus uittreden en daar voor moerassige omstandigheden zorgen. Dit wordt een helocene bron genoemd. Daarnaast kan water als een puntbron dagzomen, met veel stroming (*rheocreen*), weinig stroming (*akroocreen*) of op de bodem van een poel of vijver (*limnocreen*) (Verdonschot 2000; Springer & Stevens, 2008). De invloed van grondwater kan continu aanwezig zijn, seizoensafhankelijk zijn of anderszins tijdelijk optreden. Dit is vooral van belang in droge tijden.

Grondwatergevoede ecosystemen in Nederland staan onder druk. Veranderingen in het landgebruik in de infiltratiegebieden hebben een negatief effect gehad op de kwantiteit en kwaliteit van grondwater. Zo is er sinds de tweede helft van de vorige eeuw een dicht netwerk van ontwateringsmiddelen aangelegd, is de ontwateringsbasis van sloten en beken verlaagd, zijn beboste infiltratiegebieden omgevormd tot gebieden met intensieve landbouw en wordt er steeds meer grondwater onttrokken voor onder andere drinkwaterproductie en beregening (Aggenbach, 2009). Hierdoor is de infiltratie in de bovenstroomse delen van stroomgebieden afgenomen en is de grondwaterspiegel sterk gedaald. Daarbij is het te verwachten dat met klimaatverandering de gemiddelde temperatuur en extremen in temperatuur verder zullen toenemen, net zoals perioden met weinig neerslag in de zomer. Hierdoor neemt de druk op de grondwatersystemen toe, met meer verdroging tot gevolg.

Om structurele verdroging tegen te gaan, is het nodig om op een grote landschappelijke schaal maatregelen te treffen, ook buiten de gebieden die een directe negatieve invloed ondervinden. Dit vraagt om *integraal herstel*. Zo'n herstellenaanpak is erop gericht om water langer vast te houden en te laten infiltreren in de bodem in de hoger gelegen infiltratiegebieden, door maatregelen zoals het dempen van watergangen, het omvormen van landgebruik voor een beter doorlatende bodem en een lagere belasting en het omhoogbrengen van de ontwateringsbasis. Dit heeft als doel de kwelstromen naar benedenstroomse gebieden te herstellen, met een sterkere grondwaterinvloed in terrestrische en aquatische ecosystemen als gevolg. Naast het aanvullen van het grondwater is het tegelijkertijd nodig de onttrekking van grondwater terug te dringen.



Figuur 1.1 Grondwatergevoede beek in Limburg (links), een nat schraalland in de Kempen (midden) en op de zuidelijke Veluwe (rechts).

1.2 Monitoring van herstelprojecten blijft achter

Integraal beekdalherstel heeft een grootschalige insteek, maar er is nog relatief weinig bekend over de effecten van grootschalige maatregelpakketten op het functioneren van het systeem (Verdonschot et al., 2017; De Vries & Verdonschot, 2023). Monitoring van effecten van herstelmaatregelen is vaak gericht op het volgen van de grondwaterpeilen in het gebied en soms op de benedenstroomse afvoeren, maar evaluaties van deze monitoringsdata ontbreken veelal. Ecologische effecten in specifieke N2000-natuurgebieden worden regelmatig gevolgd, met een duidelijke focus op de ontwikkelingen in de vegetatie. Ecologische monitoring in afvoerende watergangen binnen het stroomgebied is vaak slechts gebaseerd op al bestaande meetnetten, zoals het monitoringsnetwerk dat gebruikt wordt voor de toestandsbepalingen voor de Kaderrichtlijn Water (KRW). Deze vaste meetpunten worden over het algemeen eens per drie jaar gemeten. Dit meetnet is niet specifiek op het monitoren van de effecten van maatregelen gericht, waardoor bijvoorbeeld meetpunten niet op de juiste locatie liggen om de effecten van beekherstelmaatregelen te evalueren.

Om wel een uitspraak te kunnen doen over de effecten van herstelmaatregelen op de ecologische toestand in de beek kan een specifiek monitoringsprotocol worden gevolgd (Kemmers et al., 1995; Verdonschot et al., 2017). Bij het opstellen van een dergelijk protocol worden de volgende vragen beantwoord:

- Wat moet er worden gemeten?
- Waar, wanneer, hoe en door wie moet er worden gemeten?
- Hoe moeten de data worden opgeslagen en verwerkt?

Het volgen van een voor-na-controle-impact-methode (Before-After-Control-Impact-opzet) is daarbij van groot belang, zodat op controle- en maatregellocaties in meerdere jaren voor en na de uitvoering van de maatregel de relevante parameters in de beek wordt gemonitord (Van der Lee et al., 2021). Met een dergelijk protocol is de meetstrategie helder vormgegeven en zijn de opgehaalde data beter bruikbaar. Daarnaast kan de voortgang – tussentijds en aan het eind van het project – worden geëvalueerd, zodat de aanpak kan worden bijgestuurd wanneer het gewenste effect achter blijft te blijven.

1.3 Mogelijkheden voor monitoring van herstel van grondwaterinvloed

Idealiter doelt integraal hydrologisch herstel van beekdallandschappen op een vermindering van piekafvoeren, stabilisatie van de stroomsnelheid, een verbetering van de watervoerendheid en herstel van de invloed van grondwatervoeding in beken. De focus ligt hier op de laatste factor.

Enkele conventionele methoden voor het bepalen van grondwatervoeding van beken zijn het meten van trends in grondwaterstanden, het gebruik van grondwaterstromingsmodellen en het bepalen van de basisafvoer (baseflow-index). Er wordt echter maar weinig gemeten aan beekafvoeren en vaak alleen in de grotere benedenstroomse watergangen, omdat het relatief duur is om een meetinstallatie te installeren, terwijl er veel kleinere beeklopen zijn in een gemiddeld stroomgebied (Verhagen et al., 2014). Grondwatermodellen hebben als nadeel dat ze een grovere resolutie hebben en daarmee maar een beperkte zeggingskracht hebben over de randvoorwaarden voor een goede ecologische toestand van beken. De voor de ecologie relevante waarden liggen namelijk vaak binnen een klein bereik.

Voor het terrestrische systeem zijn bepaalde vegetatietypen duidelijk geassocieerd met grondwatervoeding, ondiepe grondwaterstanden en een basenrijke, nutriëntarme bodem. Hier kunnen natuurdoeltypen zoals de associatie van Paarbladig Goudveil of het Goudveil-essenbos worden ingezet als indicator voor herstel van kwelvoeding (Schaminée et al., 2022). Voor het aquatische systeem is echter nog niet duidelijk hoe en welke organismen kunnen worden gebruikt om een herstelde grondwaterinvloed te indiceren.

Om een beter inzicht te krijgen in de effecten van herstel op de ecologische toestand in herstelde beken, kan er naar specifieke organismen worden gekeken die indicatief zijn voor een herstelde of juist gedegradeerde toestand. Deze zijn gevoelig voor bepaalde milieufactoren, zoals stroming en temperatuur. Op basis van de indicatieve waarden van organismen zijn zogenoemde *metrics* ontwikkeld, gedefinieerd als meetbare kenmerken van een gemeenschap waarvan empirisch is aangetoond dat deze veranderen langs een gradiënt van menselijke invloed (Karr & Chu, 1999). Metrics kunnen dus worden gebruikt om een specifieke en voorspelbare respons van de macro-invertebratengemeenschap weer te geven in reactie op het totaal aan menselijke activiteiten, zoals morfologische degradatie of organische belasting (AQEM Consortium, 2002). Andere manieren om de algemene achteruitgang van de macrofaunagemeenschap te meten, gebaseerd op een breed scala aan stressoren zoals landgebruik en waterkwaliteit, zijn het gebruik van multimetrics of voorspellingssystemen, die de afstand van de gemeenschap tot een referentie meten (Lorenz et al., 2004).

Metricsystemen zijn vaak ontwikkeld om algemene achteruitgang weer te geven, niet om de invloed van één of meerdere specifieke stressoren aan te tonen (Hering et al., 2006; Marzin et al., 2012). Om de precieze oorzaken van een verminderde kwaliteit in beeld te kunnen brengen, is het echter juist nodig om te kijken naar metrics gebaseerd op stressorspecifieke indicatiewaarden van organismen, zoals voor zuurgraad, stroomsnelheid of voor droogte (Lorenz et al., 2004).

Voor het inventariseren van op de macrofaunagemeenschap gebaseerde metrics die potentieel geschikt zijn om herstel van grondwaterinvloed te indiceren, kan in het bijzonder worden gekeken naar de factor temperatuur. Locaties die onder invloed staan van (diep) grondwater worden namelijk gekenmerkt door relatief stabiele omstandigheden, zowel wat betreft watertemperatuur, afvoer en de chemische samenstelling van het water. Grondwaterinvloed kan de thermische omstandigheden in een waterlichaam sterk bepalen: waar kwelwater uittreedt, heeft het water een zeer constante temperatuur van rond de 10°C, de gemiddelde jaartemperatuur van het grondwater in Nederland. In de winter zal dit soort kwelwaterplekken niet bevriezen en in warme zomers waarbij droogval optreedt, zal op deze locaties het water relatief koel blijven. Een sterk gebufferde temperatuur is een belangrijke abiotische randvoorwaarde voor een geschikt habitat voor aquatische organismen die een constante leefomgeving prefereren. Deze organismen kunnen daarmee indicierend zijn voor situaties met grondwateruittreding. Er is behoefte aan zulke indicatoren voor grondwaterinvloed in beken (Land & Peters, 2023), waarmee het functioneren en herstel van beekdallandschappen op een relatief eenvoudige wijze in kaart kan worden gebracht (quickscan) zonder dat hiervoor direct uitgebreide hydrologische metingen noodzakelijk zijn.

Dit leidt tot de vraag waarop in dit rapport verder wordt ingegaan: *Is het mogelijk om de effecten van grondwaterinvloed in herstelde beken in kaart te brengen met behulp van metrics gebaseerd op indicerende organismen in de beek?*

1.4 Afbakening studiegebied

Ieder watertype en iedere biogeografische regio hebben hun eigen kenmerkende soorten organismen. Hun aan- en afwezigheid wordt bepaald door de milieufactoren die heersen in hun leefomgeving, naast hun gevoeligheid voor verstoringen, hun verspreidingscapaciteit en de aanwezigheid van en interacties met andere organismen. Daarom is het nodig om metrics specifiek voor een watertype en regio te formuleren.

In deze studie ligt de focus op de boven- en middenlopen van beken op de hoge zandgronden van Nederland (Figuur 1.2), om juist hier de effectiviteit van herstelmaatregelen te bepalen (KRW-watertypen R4, R5, R13, R14, R19, R20). In de referentiesituatie staan deze systemen sterk onder invloed van grondwater dat afkomstig is uit hoger gelegen infiltratiegebieden op zandgronden. In de vorm van kwel komt grondwater aan de oppervlakte in laagtes of bij breuklijnen, waar het bijvoorbeeld bronnen of kwelmoerassen vormt (Verdonschot, 2000).

Watertype

- Langzaam stromende wateren (R3, R4, R5, R11, R12)
- Snel stromende wateren (R9, R10, R13, R14, R17, R18)

Grondsoorten hoofdklassen

- Zand-gronden
- Veen-gronden
- Zeeklei-gronden
- Jonge Rivierklei
- Oude klei
- Leem-gronden
- Stenige gronden
- Bebouwd
- Water



Figuur 1.2 Kaart met ligging van hoge zandgronden en beken in Nederland. R3/4 droogvallende en permanent langzaam stromende bovenloop op zand, R5 langzaam stromende middenloop op zand, R11/12 langzaam stromende bovenloop en middenloop op veen, R9/10 langzaam stromende bovenloop en middenloop op kalk, R13/14 snelstromende bovenloop en middenloop op zand, R17/R18 snelstromende bovenloop en middenloop op kalk. Niet afgebeeld: R19 doorstroommoeras, R20 moerasbeek.

1.5 Doel en vraagstelling

In het kader van beleidsondersteunend onderzoek voor het Ministerie van LNVN werkt Wageningen Environmental Research aan het inzichtelijk maken van effectief hydrologisch herstel van beekdallandschappen.

Aan de hand van een literatuuronderzoek is geïnventariseerd welke op de macrofaunagemeenschap gebaseerde metrics kunnen worden gebruikt voor het indiceren van grondwateruittrekking in de boven- en middenlopen van beken op de hogere zandgronden. Daarbij worden de volgende vragen behandeld:

Welke op macrofaunagemeenschappen gebaseerde metrics kunnen in theorie worden gebruikt om grondwateruittrekking te indiceren? Kunnen deze metrics worden aangepast voor toepassing op boven- en middenlopen van Nederlandse beken?

Op basis van deze lijst is de indicatie van grondwateruittrekking in het veld onderzocht. Daarbij is de volgende vraag gesteld:

Hoe kan de macrofaunagemeenschap (en daarop gebaseerde metrics) gebruikt worden als indicator voor grondwateruittrekking?

Tot slot is de toepasbaarheid van geselecteerde metrics voor het in kaart brengen van het herstel van grondwaterinvloed binnen integraal beekdalherstel getoetst door monitoringsdata te analyseren. Daarbij is de volgende vraag behandeld:

Welke combinaties en vormen van op de macrofaunagemeenschap gebaseerde metrics kunnen worden gebruikt om grondwaterinvloed aan te tonen?

1.6 Leeswijzer

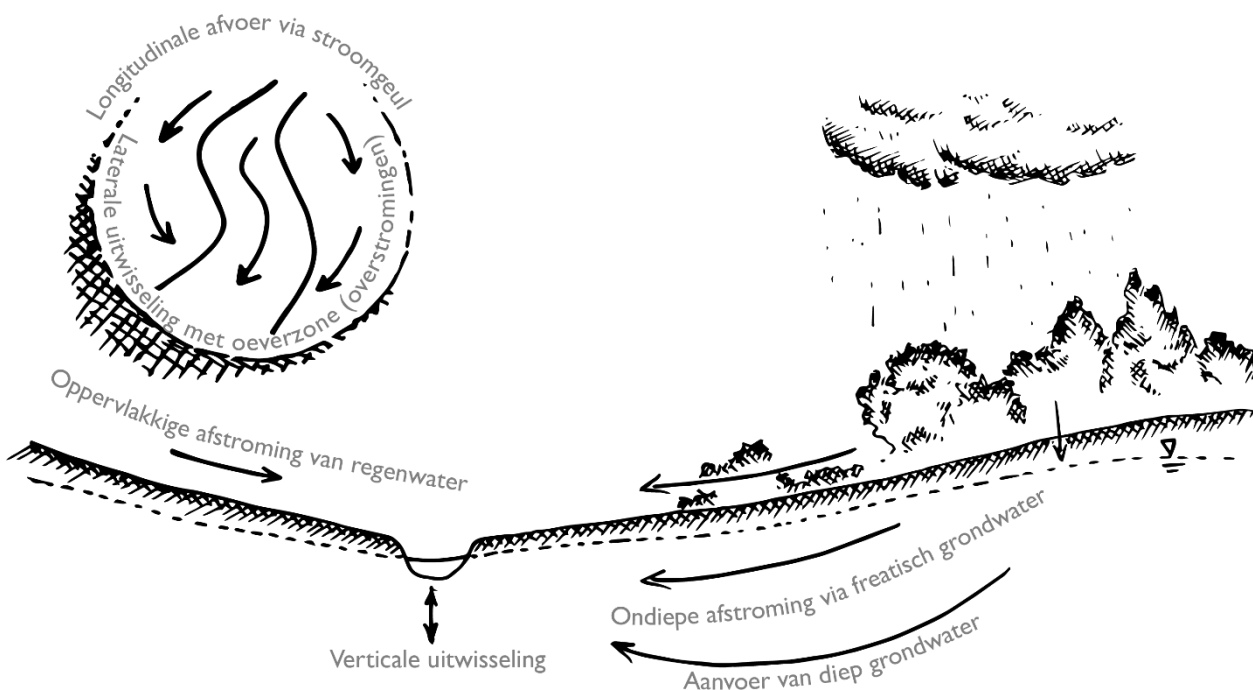
Het functioneren van grondwatersystemen wordt toegelicht in **hoofdstuk 2**. **Hoofdstuk 3** gaat in op de eerste onderzoeksvraag en geeft een overzicht van mogelijk te gebruiken, op macrofauna gebaseerde metrics voor het indiceren van grondwaterinvloed. Vervolgens wordt er in **hoofdstuk 4** verslag gedaan van een veldexperiment, waarin de indicatie van grondwateruittrekking wordt getoetst in een praktijkcasus. Hierop volgt in **hoofdstuk 5** een toepassing van de metrics op Nederlandse monitoringsdata om te onderzoeken of en hoe deze kunnen worden gebruikt in de Nederlandse situatie. **Hoofdstuk 6** bevat de conclusies en aanbevelingen op basis van het onderzoek.

2 Achtergrond functioneren beekstelsysteem

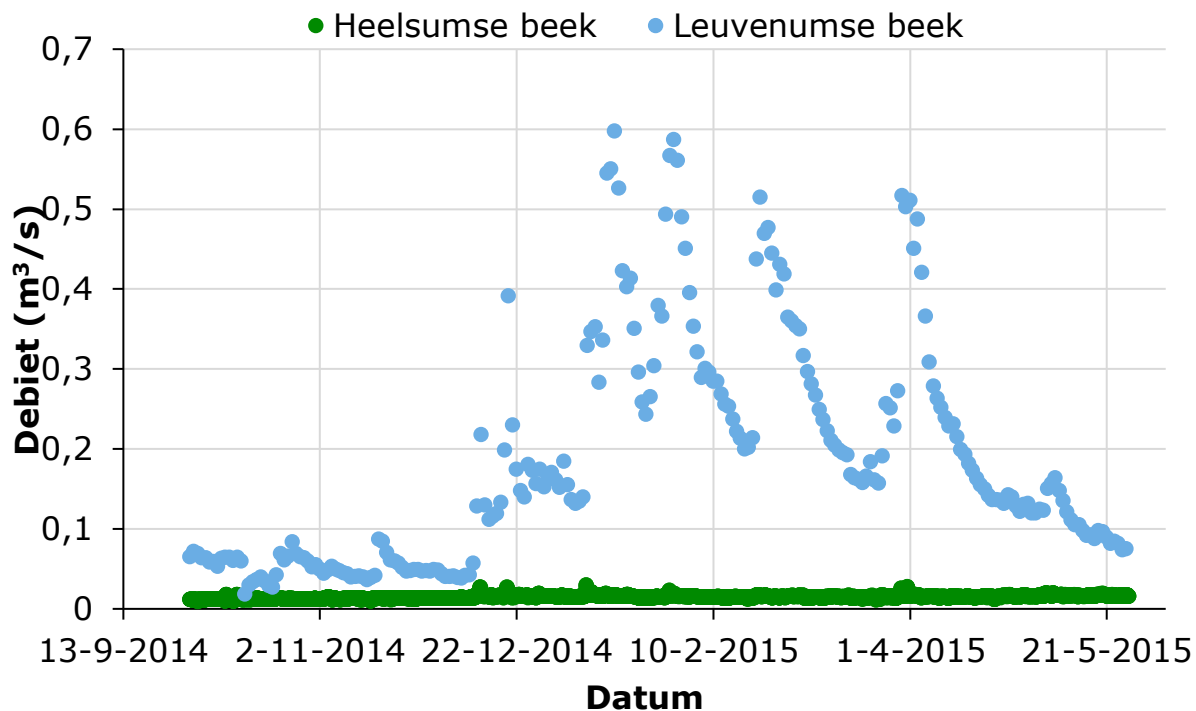
2.1 Herkomst water en afvoer van beken

Beken voeren het oppervlakkig afstromende en lokaal geïnfiltreerde en kwellende water in een stroomgebied af. Ook dieper grondwater dat een langere afstand aflegt van de infiltratiegebieden via de diepere grondlagen naar het beekdal stroomt na lange tijd de beek in. De samenstelling van het water dat de beek voedt, is afhankelijk van de bron van het water en de route die het heeft afgelegd. De verschillende routes zijn afhankelijk van onder andere reliëf, vegetatie en bodemeigenschappen (Allan, 1995). Bovenstrooms wordt een beek vaker gevoed door relatief jong grondwater, benedenstrooms door ouder grondwater (Besse-Lototskaya, 2007).

De afvoer van een beek kan dus bestaan uit een combinatie van snelle en langzame waterstromen, met bovenstroomse aanvoer, oppervlakkige afstroming, ondiepe en diepe grondwateraanvoer als componenten (Figuur 2.1). De afvoer van beken die een groot aandeel oppervlakkige afstroming ontvangen en weinig tot geen grondwater zal snel reageren op neerslag, met grote afvoerpieken tot gevolg. Bij weinig neerslag kunnen deze beken ook gemakkelijk droogvallen. Andersom zijn er ook beken die een groot aandeel diep grondwater ontvangen; deze beken hebben een stabiel afvoerpatroon (Figuur 2.2).



Figuur 2.1 Routes die het water aflegt in een stroomgebied van een beek.



Figuur 2.2 *Verskil in afvoerdynamiek tussen een door diep grondwater gevoede beek (Heelsumse beek) en een sterk op oppervlakkige afstroming reagerende beek (Leuvenumse beek) op de Veluwe.*

Typologisch zijn er verschillen tussen de Nederlandse beekdallandschappen in verschillende regio's. Er is bijvoorbeeld onderscheid te maken tussen de Brabantse en Drents-Friese beekdalen in met veen opgevulde erosiegeulen, Twentse bronbeken met veel kwel op de randen van stuwwallen, Achterhoekse beken die afwateren in het IJsseldal met enkel lokale kwel en door de mens gegraven sprengbeken op de Veluwe (OBN-Dt-beekdallandschap, 2011). Elk van deze beektypes heeft een kenmerkende landschappelijke context, en verschilt onder andere in de herkomst en omvang van watervoeding, de basenrijkdom van het aangevoerde water en de mate van permanentie.

2.2 Waarom is grondwaterinvloed in beken ecologisch relevant?

De grondwatercomponent in de afvoer is voor het beekecosysteem van groot belang. Het aangevoerde grondwater vormt een stabiele basisafvoer en voorkomt daarmee droogval van beken in perioden met weinig neerslag. Ook voert het grondwater mineralen aan vanuit de ondergrond, waardoor de chemische compositie van het ontvangende water wordt beïnvloed. Dit kan bijvoorbeeld zorgen voor een verhoogde buffering. Daarnaast beïnvloedt het grondwater de watertemperatuur van de beek, omdat het naar de beek aangevoerde grondwater een relatief constante temperatuur heeft die de bodemtemperatuur volgt. Dit kan de temperatuurfluctuatie van de beek lokaal sterk dempen (Kaandorp et al., 2019). Veel karakteristieke soorten macrofauna en vissen van laaglandbeken zijn gevoelig voor hoge watertemperaturen. Dit worden koud-stenotherme soorten genoemd. Deze soorten zijn gebonden aan beken met een gebufferde watertemperatuur. Naast de waarde voor specialistische soorten als habitat kunnen zones in de beek met een sterke grondwatervoeding als koudwater-refugia fungeren waar organismen kunnen overleven wanneer het omringende water door temperatuurstijging hun fysiologische grenzen overschrijdt (Isaak et al., 2015). Kortom, een combinatie van factoren zorgt op habitatschaal voor specifieke abiotische omstandigheden op plekken waar grondwater de beek voedt, waar beekorganismen hun niche vinden (Land & Peters, 2023). Door grondwatergevoede beken kunnen daarom biodiversiteitshotspots vormen.

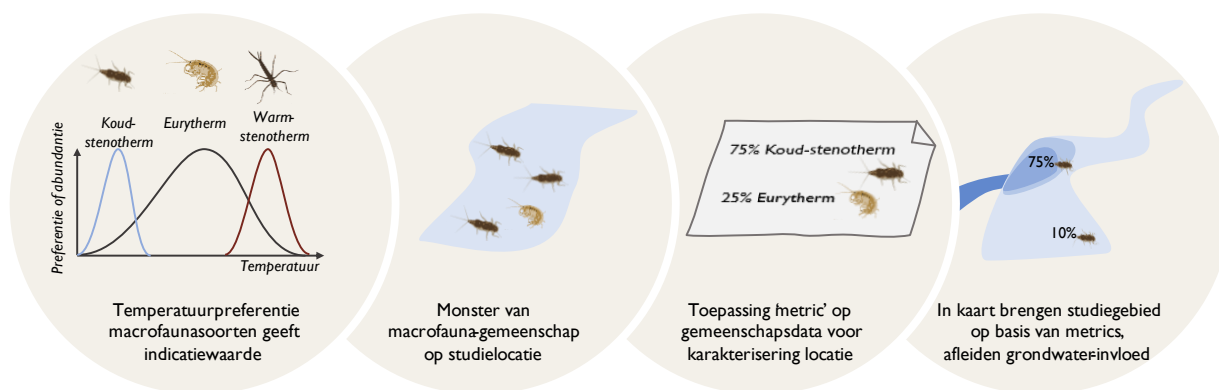
3 Shortlist metrics grondwateruittreding

3.1 Methode

Aan de hand van internationale en Nederlandstalige literatuur is een literatuurstudie verricht om te inventariseren welke biologische metrics er worden gebruikt om de grondwaterinvloed in het algemeen en specifiek de temperatuurinvloed te indiceren. Hierbij werd gekeken naar terrestrische en aquatische toepassingen. Vervolgens is nagegaan welke data beschikbaar zijn om deze metrics toe te passen op de in Nederland voorkomende macrofaunagemeenschappen.

3.2 Inventarisatie metrics voor grondwaterinvloed

De biologische aanpassingen van een soort (*traits*), zoals de manier van voortbewegen of vliegcapaciteit, vormen de basis voor de ecologische preferenties voor (combinaties van) milieuomstandigheden (Verdonschot & Verdonschot, 2021). Organismen die een specifieke voorkeur hebben voor bepaalde milieufactoren kunnen daarom ook gebruikt worden om milieuomstandigheden te indiceren.



Figuur 3.1 Het gebruik van soortspecifieke kenmerken in een gemeenschap-gebaseerde metric voor de indicatie van grondwaterinvloed.

De preferentie van meerdere soorten of de totale gemeenschap kan worden samengenomen in een metric (Figuur 3.1). Hiervoor kunnen onder meer de soortenrijkdom, diversiteit, tolerantie en/of functionele aspecten van de soorten worden gebruikt (Wagenhoff, 2016) (Tabel 3.1). Meerdere metrics kunnen worden gecombineerd tot *multimetric indices*, met als voordeel dat er een brede detectiemogelijkheid is die meerdere stressoren omvat. Dit heeft als resultaat een completer beeld van de toestand. Ook kan deze aanpak een stabielere resultaat geven dan wanneer een enkele metric wordt toegepast en is deze door het gebruik van meer informatie uit een enkel monster kosteneffectief (AQEM Consortium, 2002).

Tabel 3.1 Overzicht van veelgebruikte metric-categorieën (gebaseerd op AQEM Consortium, 2002).

Metric-categorie	Voorbeeld van metric
Soortenrijkdom	Aantal EPT taxa (Ephemeroptera, Plecoptera en Trichoptera)
Soortensamenstelling	% Dominante taxon
Diversiteit	Shannon-Wiener diversiteit
Similariteit/verlies	Missende taxa
Tolerantie	Saprobie index
Functionele/trofische kenmerken	% Shredders
Habitatpreferentie	Aantal sessiele soorten
Stromingspreferentie	% Limnofiel
Zonering	% Bronsoorten
Voortplantingsstrategieën	% Univoltien
Individuele conditie	% Individuen in slechte conditie

In de internationale literatuur wordt er een aantal metrics genoemd die potentieel geschikt zijn om de invloed van grondwateruittreding te indiceren, eventueel na aanpassing aan de Nederlandse situatie, en bij terrestrische metrics aan de aquatische context (Tabel 3.2). Deze zijn gebaseerd op het voorkomen van indicerende soorten die gebonden zijn aan een bepaalde temperatuur, een constant milieu of een bepaalde aan het hydrologisch of thermisch regime aangepaste levensstrategie.

Tabel 3.2 Overzicht van metrics die toegepast kunnen worden om de invloed van grondwateruittreding te indiceren.

Metric	Gebaseerd op	Reference
Community Temperature Index (CTI)	Gemeenschap-gewogen gemiddelde van soortspecifieke temperatuurpreferenties	Bowler, 2017; Lajeunesse, 2023
Trichoptera sensitivity	Temperatuurpreferentie (warmteminnend en koudeminnend), stromingszonering, duur emergentieperiode, voedingstype	Hering, 2009
Gevoeligheid EPT taxa	Voltinisme, stromingszonering, duur emergentieperiode, affiniteit voor bovenloopjes, hoogtezonering	Macadam et al., 2022
Droogtetolerantie van gemeenschap	Soortspecifieke preferenties	Bhowmik & Schäfer, 2015

De CTI (Community Temperature Index) wordt gebruikt als indicator om weer te geven hoe de samenstelling van een gemeenschap overgaat van koudeminnende soorten naar warmteminnende soorten. Deze is te berekenen door het gemiddelde te nemen van de temperatuurpreferentie van elk van de soorten in een gemeenschap. Optioneel is deze daarnaast ook te wegen naar de abundantie van de soorten. Deze indicator wordt gebruikt als 'biothermometer' om de invloed van klimaatverandering weer te geven en is, in vergelijking met andere indicatoren voor de impact van klimaatverandering, relatief simpel van opzet en generaliseerbaar. Anderzijds kunnen trends in de CTI niet alleen veranderingen in temperatuur weergeven, omdat deze preferenties vaak gekoppeld zijn aan andere soortpreferenties en deze daarmee feitelijk de respons van de soorten op andere milieufactoren weergeeft. Deze indicator is eerder toegepast op vegetatie (Sparrus et al., 2018), vogels en vissen (Bowler et al., 2017), vlinders (Zografou et al., 2014; Devictor et al., 2012) en andere taxonomische groepen van terrestrische organismen (Lajeunesse et al., 2022). De temperatuurpreferenties zijn hier gebaseerd op de gemiddelde voorjaarstemperatuur die heerst in het broedgebied (voor vogels) of op de gemiddelde jaarstemperatuur over het totale verspreidingsgebied (andere groepen).

Een andere manier om de impact van temperatuurverandering in kaart te brengen, is door te kijken naar de kenmerkende of specifiek gevoelige taxonomische groepen. Zo kunnen de verspreiding en de ecologische preferenties van kokerjuffers (Trichoptera) worden gebruikt om de impact van klimaatverandering in Europese ecoregio's te traceren (Hering et al., 2009). Ook in een aantal andere studies werd de gevoeligheid van aquatische organismen voor temperatuuroptoes in het kader van klimaatverandering op basis van hun functionele eigenschappen uitgedrukt, waarbij naast de kokerjuffers ook steenvliegen (Plecoptera), vliegen en muggen (Diptera), libellen (Odonata) en een combinatie van haften, steenvliegen en kokerjuffers (Ephemeroptera-Plecoptera-Trichoptera; EPT) werden gebruikt (Tierno de Figueroa et al., 2009; Macadam et al., 2022; Bhowmik & Schäfer, 2015).

Hering et al. (2009) verzamelden op basis van literatuurgegevens voor een groot aantal Trichoptera-soorten de ecologische preferenties. De gevoeligheid voor veranderingen in het klimaat kon vervolgens worden afgeleid uit verschillende eigenschappen: endemisme (gebondenheid aan een in omvang gelimiteerd gebied), preferentie voor bronnen, preferentie voor een lage watertemperatuur, korte emergentieperiode (periode dat een organisme als imago vliegt) en de manier van het vergaren van voedsel. Echter, van een groot aantal soorten, waaronder de aquatische fauna, zijn slechts weinig preferentiedata beschikbaar. Dit belemmert de toepassing als indicator.

Voor het vaststellen van grondwateruittreding kan een aantal van de kenmerken worden gebruikt uit de studie van Hering et al. (2008). Wanneer warmteminnende soorten in staat zijn naar bovenstroomse gebieden te migreren (omdat daar de watertemperatuur is toegenomen), kunnen deze soorten worden gebruikt als negatieve indicatorsoorten. Hieronder vallen bijvoorbeeld soorten uit grote rivieren, die worden gekenmerkt door preferenties voor hogere temperaturen of door een brede tolerantierange (eurytherm). Koudstenotherme soorten zijn juist aangepast aan lage watertemperaturen en kunnen daarmee de aanwezigheid van grondwaterinvloed indiceren. Soorten met een korte emergentieperiode zijn bijzonder gevoelig voor veranderingen in de temperatuur, terwijl soorten met een a-cyclische levenscyclus en soorten met meerdere generaties per jaar beter zijn aangepast aan afvoerpieken of droogte met een impact op aquatische levensstadia (Hering et al., 2008). De eerste groep indiceert grondwaterinvloed, terwijl de tweede groep juist als negatieve indicator kan dienen.

3.3 Ondersteunende soortspecifieke data

Voor toepassing van deze metrics op de gemeenschappen die voorkomen in boven- en middenlopen van Nederlandse beken is het nodig om deze metrics aan te passen. Dat kan door gebruik te maken van de eigenschappen van specifiek in Nederland voorkomende aquatische organismen, hun tolerantiegrenzen, preferenties en traits (autoecologische data). Zulke soortspecifieke kenmerken kunnen worden verkregen uit internationale literatuur, die onder andere is gebundeld in de uitgebreide database *freshwaterecology.info* (Euro-limpacs consortium, 2006) (Tabel 3.3).

In de hierboven aangehaalde studies die de CTI berekenen, werd de temperatuurpreferentie vaak afgeleid uit verspreidingsdata geassocieerd met de gemiddelde jaartemperatuur van de omgeving op deze locaties. Deze methode is echter niet direct toepasbaar op aquatische organismen. De watertemperatuur kan lokaal erg variëren, door bijvoorbeeld grondwaterinvloed of beschaduwing, en er zijn amper geschikte monitoringsdata beschikbaar die variatie op deze fijne ruimtelijke en temporele schaal vastlegt. Daarnaast berusten de preferenties van aquatische organismen niet enkel op een gemiddelde, maar juist op een gevoeligheid voor de extremen en variabiliteit in milieuomstandigheden gedurende de gehele levenscyclus van een soort (Van der Lee et al., 2020; Waldock, 2018). Dit vereist dus een hogere resolutie aan data van zowel de soorten als de milieuomstandigheden. Mogelijk is er wel een proxy voor de hoogte en variabiliteit van de temperatuur te gebruiken.

Uit een samenvoeging van de gegevens uit de internationale literatuur is wel een geprefereerde temperatuurrange voor bepaalde aquatische taxa bekend, waarbij koud-stenotherme en warm-stenotherme soorten worden onderscheiden van de minder gespecialiseerde eurytherme soorten (Euro-limpacs consortium, 2006).

Naast de preferente temperatuurrange van organismen kunnen andere kenmerken worden gebruikt als extra bron van informatie. Zo kan een preferentie voor de bronzone in de beek (eucrenaal en hypocrenaal) tot op zekere hoogte als proxy dienen voor een preferentie voor een lage temperatuur (Macadam et al., 2022).

Bij het indiceren van grondwateruittreding in midden- en benedenlopen van beken kan ook worden gekeken naar de factoren watervoerendheid en droogte. Bij een versterkte grondwatervoeding zullen organismen die zeer gevoelig zijn voor droogval vaker voorkomen en organismen die bekendstaan om hun droogteresistentie juist minder vaak gevonden worden.

Daarnaast kan het voorkomen van taxa met een korte emergentieperiode informatief zijn, omdat deze taxa gevoelig zijn voor veranderingen in de temperatuur en zones met grondwateruitreding (vanuit diepe aanvoer) juist gekenmerkt worden door een relatief beperkte temperatuurvariatie.

Tabel 3.3 Overzicht van soortspecifieke kenmerken die toegepast kunnen worden ter onderbouwing van metrics om de invloed van grondwateruitreding te indiceren.

Soortspecifiek kenmerk	Referentie
Preferente stromingszone	Moog, 2017
Longitudinale verdeling	Tachet et al., 2010
Preferente temperatuurrange	Euro-limpacs consortium, 2006; Graf et al., 2006; Schmidt-Kloiber et al., 2008
Temperatuurpreferentie (o.b.v. gemiddelde maximum zomertemperatuur)	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Focustemperatuur en temperatuurspecificiteit	Halle et al., 2016
Indicator voor parameter	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Droogte-indicator	Straka et al., 2019
Grondwaterinvloed-indicator	Working Group Aquatic Ecology (2016)
Droogteresistentie per levensstadium	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Droogteresistentie vorm 1	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Droogteresistentie vorm 2	Tachet et al., 2012
Indicatie voor droogval met bepaalde duur	Verberk et al. 2012: Aquatische Ecotooptypen (Verdonschot et al., 1992; Van der Hoek & Verdonschot, 1994); EKKO (Verdonschot, 1990), Autoecologische data
Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu	Verberk et al., 2012: Aquatische Ecotooptypen (Verdonschot et al., 1992; Van der Hoek & Verdonschot, 1994)
Grondwaterinvloed	Euro-limpacs consortium, 2006; Graf et al., 2006
Duur van emergentieperiode	Euro-limpacs consortium, 2006; Graf et al., 2006

Voor de kenmerken in Tabel 3.3 is nagegaan wat de beschikbaarheid van preferentiedata voor in Nederland voorkomende macrofauna is. Hiervoor zijn de bestaande databases gebruikt (TWN-lijst met Nederlandse taxa en eerdergenoemde preferentiedatabases). In Tabel 3.4 is voor elke categorie binnen een kenmerk weergegeven hoeveel Nederlandse taxa zijn geclassificeerd. Voor een aantal kenmerken is er een groot aandeel van de taxa als 'overig/anders' geclassificeerd, of is er slechts een zeer klein aantal soorten dat kenmerken bezit die gebruikt kunnen worden voor het afleiden van een metric voor temperatuuffecten (onder andere longitudinale verdeling, vorm van droogteresistentie, (droogte)indicatie, duur van emergentieperiode). Deze kenmerken zijn daarmee minder geschikt voor toepassing in een metric. In totaal zijn er 97 in Nederland aanwezige soorten die positief indicierend zijn voor de selectie van kenmerken.

Tabel 3.4 Samenvatting van het aantal Nederlandse macrofaunasoorten/taxa dat is geclassificeerd voor de geselecteerde soortspecifieke kenmerken om grondwateruitreding te detecteren, inclusief het aantal niet-geclassificeerde soorten. Kenmerken met een * zijn geclassificeerd in categorieën volgens een 10-puntensysteem (fuzzy coding). Een taxon is tot een categorie gerekend wanneer deze 5 of meer punten scoorde in een relevante categorie (Schmidt-Kloiber & Hering, 2015).

Soort-specifiek kenmerk	Categorieën	Aantal taxa
Preferente stromingszone*	Eucrenaal (bron)	24
	Hypocreanaal (bronloopje)	8
	Epirhithraal (bovenloop)	20
	Overig	1006
	Ongeclassificeerd	0
Longitudinale verdeling*	Crenon	1
	Epirithron	0
	Anders	23
	Ongeclassificeerd	935

Soort-specifiek kenmerk	Categorieën	Aantal taxa
Preferente temperatuurrange	Koud stenotherm (< 10°C)	36
	Warm stenotherm (> 18°C)	140
	Eurytherm	308
	Ongeclassificeerd	574
Temperatuurpreferentie (gemiddelde maximum zomertemperatuur) *	<6	0
	6-10	15
	Overig	273
	Ongeclassificeerd	770
Focustemperatuur	Focustemperatuur	401
	Ongeclassificeerd	657
Temperatuurspecificiteit	Temperatuurspecificiteit	401
	Ongeclassificeerd	657
Indicator voor parameter	Lage temperatuur	2
	Droogval	1
	Overig	13
	Ongeclassificeerd	1042
Droogte-indicator	Sterke indicatie	41
	Matige indicatie	30
	Ongeclassificeerd	987
Grondwaterinvloed-indicator	Wel	35
	Niet	1023
Droogteresistentie per levensstadium	Geen droogteresistentie	977
	Diapauze ei-stadium	35
	Diapauze in larvaal stadium	16
	Diapauze in adult stadium	25
	Ongeclassificeerd	5
Droogteresistentie vorm 1*	Afwezig	13
	Ei	38
	Cocon	2
	Behuizing	5
	Diapauze of slaaptoestand	65
	Inactiviteit	6
	Ongeclassificeerd	946
Droogteresistentie vorm 2	Afwezig	55
	Ei	24
	Cocon	30
	Behuizing	0
	Diapauze of slaaptoestand	34
	Ongeclassificeerd	941
Indicatie voor droogval met bepaalde duur*	Temporair (langer dan 5 maanden droogvallend)	1
	Temporair (3-5 maanden)	2
	Temporair (6 weken-3 maanden)	6
	Semi-permanent (korter dan 6 weken)	3
	Permanent (niet droogvallend)	814
	Ongeclassificeerd	188
Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu*	Wel	56
	Overig	901
	Ongeclassificeerd	101
Duur van emergentieperiode	Kort (< 50 dagen)	131
	Lang	199
	Ongeclassificeerd	728
Totaal positief indicierend		97

3.4 Toepassing metric

Voor de toepassing van metrics op de Nederlandse situatie zijn er ondersteunende methoden gevonden in de literatuur. Ofenböck et al. (2004) kozen uit een lange lijst mogelijke metrics een selectie van metrics die corresponderen met een gradiënt van een specifieke stressor en die een robuuste respons gaven. Een voorwaarde daarvoor was een voldoende groot aantal locaties om dit patroon weer te geven. Noble et al. (2007) noemden als criteria voor het ontwikkelen van een metric dat deze 1) een solide ecologische onderbouwing hebben, 2) statistisch robuust zijn en 3) methodologisch goed toepasbaar zijn. De metric moet ook gevoelig genoeg zijn om veranderingen te detecteren in de structuur of functie van de onderzochte gemeenschap. Wanneer een lijst van kandidaat-metrics is geselecteerd, zouden idealiter alle mogelijke varianten hiervan moeten worden getest. Zo kan worden getest of de gevoeligheid van de metric wordt beïnvloed wanneer het percentage/aantal soorten/individuen met een bepaald kenmerk of enkel de aanwezigheid van een kenmerk wordt genomen. Wanneer een geschikte metric voor grondwateruittreding in beken wordt ontwikkeld, kunnen daarvoor deze richtlijnen gebruikt worden (Verdonschot & Verdonschot, 2021):

1. Valideer de geselecteerde indicatoren met behulp van bestaande gegevens van locaties met een bekende waterkwaliteit of andere status ten aanzien van één of meerdere stressoren.
2. Werk de indicator-stressorrelatie watertype-specifiek uit.
3. Onderbouw de keuze voor een bepaalde indicator met literatuurreferenties.
4. Autoecologisch onderzoek is aan te bevelen voor een kwantificering van de specifieke respons van een indicator op specifieke milieuomstandigheden.

Bij de ontwikkeling van de metric moet rekening worden gehouden met het vaststellen in welke mate de metric gevoelig is, dat wil zeggen, wat de efficiëntie is van de metric om locaties met een temperatuureffect te onderscheiden. Ook kunnen er klassegrenzen worden vastgesteld, in het bijzonder wanneer de relatie tussen een stressor (hogere temperatuur) en de respons (voorkomen indicatorsoorten) niet lineair is (Öfenböck et al., 2004).

3.5 Outlook voor toepassing metric

Er is gekeken naar soortspecifieke kenmerken die als indicerende metric kunnen dienen voor grondwaterinvloed, waaronder de temperatuurgevoeligheid, specifieke habitatpreferenties en droogteresistentie. Er kan worden geconcludeerd dat er maar in beperkte mate metrics ontwikkeld zijn om de invloed van grondwateruittreding op de levensgemeenschappen in beken weer te geven. Desondanks heeft het literatuuronderzoek een aantal potentieel geschikte kandidaat-metrics opgeleverd.

Voor het detecteren van grondwaterinvloed zijn bijvoorbeeld de volgende positief scorende kenmerken te gebruiken:

- Preferente stromingszone: eucrenaal (bron) / hypocrenaal (bronloopje) / epirhithraal (bovenloop)
- Aantal taxa met preferente temperatuurrange: koud stenotherm (< 10°C)
- Temperatuurpreferentie (gemiddelde maximum zomertemperatuur) tot 10°C
- Focustemperatuur en temperatuurspecificiteit
- Aantal taxa met grondwaterinvloed-indicatie
- Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu

Kenmerken die negatief indicierend zijn, omvatten:

- Droogte-indicatie: sterk of matig (6 tot 12 weken)
- Droogte-resistentie: aanwezig

Om de geschiktste kenmerken voor een metric te selecteren, kunnen deze hierna worden toegepast op een praktijk situatie, waarbij alle mogelijke varianten en combinaties worden getest. Een voorwaarde is dat er voldoende soortspecifieke preferentiedata beschikbaar zijn. Daarbij moet er worden gelet op detectiegevoeligheid, robuustheid en praktische toepasbaarheid van de metric.

Bovendien kan op langere termijn in een experimentele opzet meer informatie worden ingewonnen over de randvoorwaarden waarbij de aan de metrics onderliggende indicatorsoorten voorkomen. Dit geeft inzicht in de geschiktheid van indicatoren voor toepassing in monitoring van herstelprojecten, de technische haalbaarheid en inhoudelijke relevantie. Dit type autoecologisch onderzoek wordt aanbevolen voor de ontwikkeling van indicatoren (Verdonschot & Verdonschot, 2021).

De ontwikkelde metric kan vervolgens worden toegepast om de effecten van herstelmaatregelen gericht op het verbeteren van de toestroming van grondwater naar beken te kunnen detecteren, alsmede bestaande koudwater-refugia te identificeren, zodat deze effectief kunnen worden beheerd en beschermd. Dit laatste is van toenemend belang in het licht van temperatuurstijgingen en toenemende extremen door klimaatverandering, waardoor koud-stenotherme beekorganismen steeds verder worden teruggedrongen in hun populatieomvang en verspreiding.

4 Veldexperiment indicatie grondwateruittreding

4.1 Introductie

In de literatuurstudie is een shortlist aan metrics geformuleerd. Om te verkennen hoe de macrofaunagemeenschap (en daarop gebaseerde metrics) gebruikt kan worden als indicator voor grondwateruittreding, is er gezocht naar een toepassing in het veld. Daarbij werd de volgende onderliggende vraag gesteld: wat zijn de patronen in de samenstelling van de macrofaunagemeenschap in een gebied dat wordt gekenmerkt door grondwateruittreding en wat zijn de sturende factoren?

Er waren niet voldoende monitoringsdata beschikbaar van een gebied waar de grondwaterinvloed is hersteld, voor en na het nemen van maatregelen. In plaats daarvan is er een locatie geselecteerd die wordt gekenmerkt door sterke grondwateruittreding; het sprengenstelsel van de Motketel op de Veluwe. Hier is gekeken naar de mogelijkheid van het detecteren en karakteriseren van grondwatergevoede habitats en het identificeren van stabiele koud water-refugia.

4.2 Studiegebied

De Motketel ligt in de buurt van Vaassen aan de noordoostzijde van de Veluwe in een smeltwaterdal uit de laatste IJstijd. Het gebied omvat een uitgebreid sprengenstelsel. Deze vinden hun oorsprong in de 17^e tot 19^e eeuw toen hier sprengkoppen en sprengbeken werden gegraven om grondwater te gebruiken als aandrijving van watermolens, destijds een belangrijke economische activiteit in dit gebied. Sprengbeken die gegraven zijn om molens aan te drijven, werden zo veel mogelijk horizontaal gelegd om voldoende hoogte te behouden, en daarvoor ingegraven in bijvoorbeeld de helling van een dal (Renes et al., 2002).

Historisch was het dal zeer nat en er trad veenvorming op. Kleischotten in de stuwwal blokkeren er namelijk de doorstroming van grondwater, dat zijn oorsprong vindt in regenwater dat is geïnfilteerd op de stuwwal en uiteindelijk via verschillende diepe stroombanen het smeltwaterdal bereikt. Dit doorstroomveen is grotendeels ontgonnen. Het grondwater passeert oude, mineralenrijke rivierafzettingen en is daardoor zwak gebufferd. De aanvoer van dit diepe grondwater is constant, waardoor de afvoer in de meeste sprengen weinig fluctueert. Enkele sprengen ontvangen echter ondieper grondwater en/of oppervlakkig afstroming en zijn daardoor veel sterker door regenwater gestuurd. De afvoer fluctueert hier sterk (sommige sprengen vallen droog) en het water is er zuur. Op een aantal plekken zijn de waterlopen rood gekleurd door ijzeroxide, dat bij uittreding van het grondwater neerslaat in vlokken, ook wel bekend als *rodolm* (Figuur 4.1). In de waterlopen bestaat het substraat verder hoofdzakelijk uit zand en organisch materiaal.

Het verval is in sprengbeken vanouds gering. De sprengen werden intensief onderhouden om de verhanglijn te handhaven voor het behouden van voldoende afvoer. Als gevolg van bronerosie in de oevers van de sprengkoppen treedt namelijk aanzanding op. Daarnaast treedt ophoping van blad en takken op. Een afname van het debiet kan stagnatie of zelfs droogval tot gevolg hebben, zeker wanneer de sprengkop dieper ligt dan de ontvangende sprengbeek (IJzerman, 1979). Dit is ook in enkele sprengkoppen van de Motketel het geval.



Figuur 4.1 Grondwateruittreiding in het sprengstelsel van de Motketel.

4.3 Methode

Selectie meetpunten

Het gebied is op 12 april 2023 bezocht met de gebiedsbeheerder. Op basis daarvan en door middel van een pilot-temperatuurmonitoring zijn er achttien locaties gekozen om de variabiliteit aan condities in het gebied te dekken (Figuur 4.2).

Bemonstering van de macrofauna en verwerking van de monsters

Op de gekozen locaties zijn telkens drie multiplates in het water geplaatst. Multiplates vormen een artificieel substraat en zijn door hun uniformiteit erg bruikbaar voor het gestandaardiseerd bemonsteren van macrofauna op plekken waar niet overal hetzelfde bodemsubstraat aanwezig is in de beek. De multiplates waren van 7 juni t/m 10 juli 2023 op de locaties aanwezig. Daarna zijn de multiplates uit het water gehaald met behulp van een net en overgebracht naar het laboratorium. In het laboratorium zijn de monsters levend uitgezocht. Alle dieren zijn geteld, geconserveerd en later op naam gebracht. Wanneer conserveren niet mogelijk was, bijvoorbeeld in het geval van platwormen, zijn de individuen direct onder de binoculair gedetermineerd.

Metingen aan milieuvariabelen

Op de locaties met multiplates zijn drie temperatuurloggers in het water geplaatst. Temperatuurloggers (HOBO MX2201) monitoren de temperatuur gedurende de bemonsteringsperiode met elk kwartier een puntmeting met een gevoeligheid van 0,04°C en een nauwkeurigheid van ±0,5°C. De bemonsteringsperiode liep van 7 juni t/m 10 juli 2023.

Om de macrofaunasamenstelling te kunnen relateren aan de omstandigheden in en rond de beek, zijn verschillende milieuvariabelen gemeten. Dit betreft fysisch-chemische variabelen: gemiddelde temperatuur (doorlopend per 15 minuten), zuurstofgehalte, geleidbaarheid, zuurgraad, nitriet- en nitraatconcentratie [$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$], fosfaat [PO_4], calciumconcentratie [Ca^{2+}], chlorideconcentratie [Cl^-], stroomsnelheid, aandeel droogval, beschaduwing, dimensies (breedte, waterdiepte) en substraatsamenstelling (visuele inschatting van het percentage bedekking van hout, CPOM, FPOM, zand, grind).

Analyse van de gegevens

De multiplates op locatie L18 zijn niet teruggevonden. Op locatie L17 is op de multiplates geen macrofauna gevonden. Deze locaties zijn daarom niet meegenomen in de analyse.

Eerst heeft taxonomische afstemming van de macrofaunagegevens plaatsgevonden. Niet elk individu kon namelijk tot op soort worden gedetermineerd, waardoor in sommige gevallen meerdere taxonomische niveaus van hetzelfde taxon in het gegevensbestand aanwezig waren. Voor de analyse is echter een gegevensbestand nodig op basis van één taxonomisch niveau per taxon. Verschillen in het determinatieniveau kunnen anders in een later stadium de oorzaak blijken te zijn van waargenomen verschillen in de macrofaunagemeenschap. Om dit te vermijden, zijn daarom voorafgaand aan de analyse de oorspronkelijke macrofaunadata taxonomisch afgestemd op basis van de frequentie van voorkomen van taxa in de monsters in combinatie met de totale abundantie per taxon (Nijboer & Verdonschot, 2000). Voor de taxonomische afstemming zijn de volgende criteria gehanteerd: 1) afstemming vond plaats op zo laag mogelijk taxonomisch niveau, bij voorkeur soortniveau, 2) indien een klasse, orde, familie of genus op een paar uitzonderingen na was gedetermineerd tot een lager niveau, is het hogere niveau verwijderd en het lagere niveau gehandhaafd en 3) indien de frequentie waarmee het hogere niveau voorkwam echter meer dan 10% van de frequenties van de onderliggende taxa gezamenlijk was, is het lagere niveau omgezet in het hogere niveau.

Vervolgens zijn per monster de milieupreferentiescores van de taxa berekend. Door het berekenen van milieupreferentiescores per monster kunnen stressoren per locatie worden vergeleken. Er is gebruikgemaakt van de selectie van preferentiescores die inzicht geven in de rol van de milieuomstandigheden in het gebied zoals omschreven in onderdeel 4.5, welke gebaseerd is op de autoecologie-lijst (Verberk et al., 2012) en de freshwater ecology-database (Schmidt-Kloiber & Hering, 2015) (Tabel 4.1). De milieupreferentiescores zijn veelal bekend op soortniveau. De berekening van de gemiddelde preferentiescore is daarom gedaan op de waarnemingen vóór taxonomische afstemming. De berekening van een gemiddelde preferentie is gedaan voor taxa waarvoor een preferentiewaarde bekend was, op basis van aanwezigheid. Wanneer de metrics in de database zijn geclassificeerd in categorieën volgens een 10-puntensysteem (fuzzy coding), zijn de gemiddelde preferenties gerapporteerd als het aantal punten in de relevante klasse(n) gedeeld door 10.

Tabel 4.1 Geselecteerde metrics voor milieupreferenties.

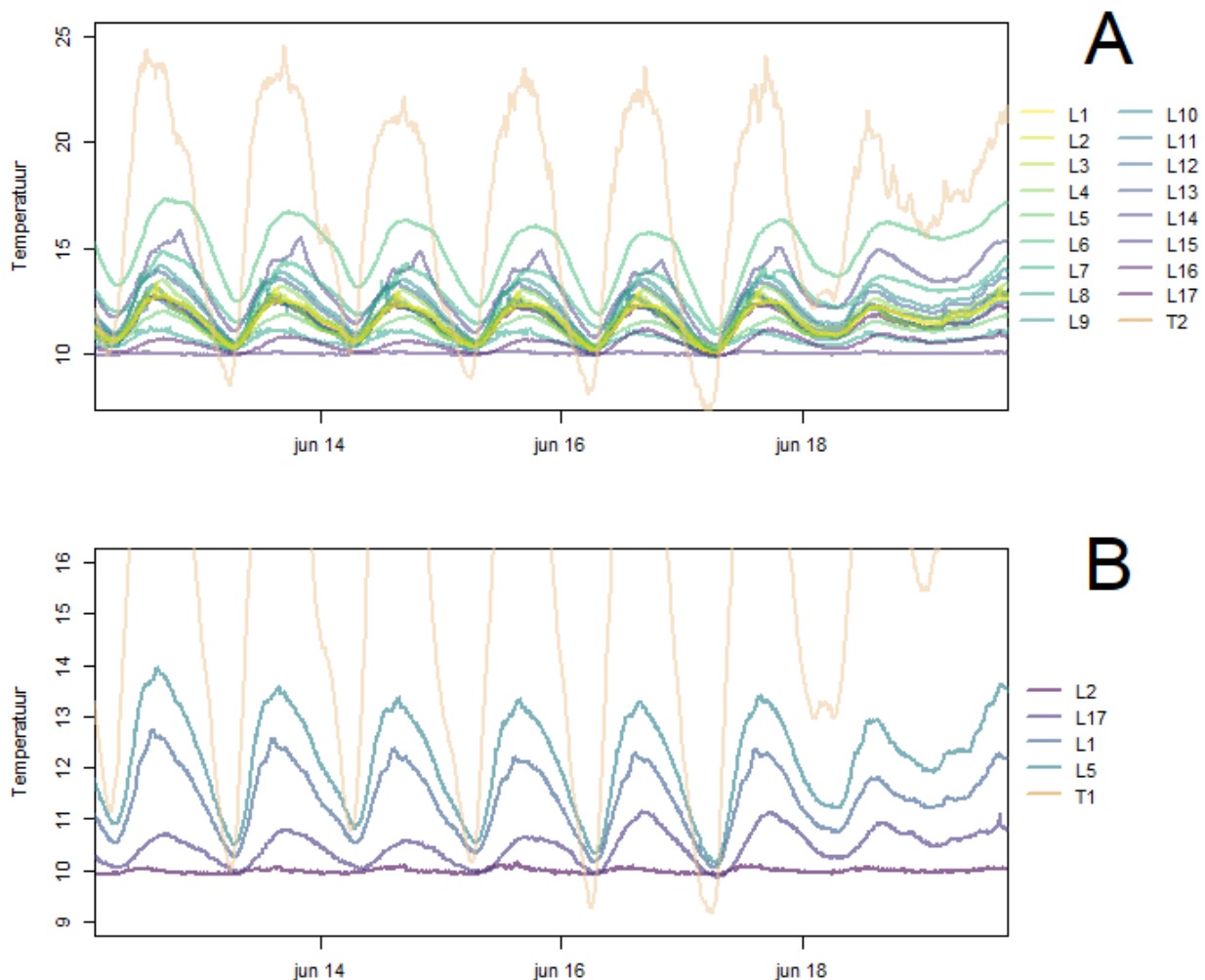
Milieupreferentie	Indeling	Bron
Preferente stromingszone: bron(loopje) / bovenloop	Fuzzy coding 0-10	Moog, 2017
Aantal taxa met koudstenotherme temperatuurrange	Binair	Euro-limpacs consortium, 2006; Graf et al., 2006, Schmidt-Kloiber et al., 2008
Temperatuurpreferentie tot 10°C	Fuzzy coding 0-10	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Focustemperatuur	N.v.t.	Halle et al., 2016
Temperatuurspecificiteit	Score 0 (niet specifiek) – 10 (zeer specifiek)	Halle et al., 2016
Aantal taxa met grondwaterindicatie	Binair	Working Group Aquatic Ecology (2016)
Voorkomen in zeer ondiep / bronmilieu	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012
Droogvalindicatie 6-12 weken	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012
Droogte-resistentievorm aanwezig	Binair	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Stromingspreferentie	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012
Saprobie	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012

Om een beeld te krijgen van de relatie tussen de taxonsamenstelling en de milieugegevens van de bronbeken is tot slot een multivariate analyse uitgevoerd in het programma R. Als invoer zijn de milieuvariabelen gebruikt die in het veld gemeten zijn. Daarnaast is op basis van de concentratie calcium en chloride de ionenratio (IR) berekend (Van Wirdum, 1990) om het grondwater te typeren. Er is een Principal Components Analysis (PCA) gedaan om de taxonsamenstelling van de monsterlocaties te vergelijken. Om de patronen in macroinvertebratensamenstelling op de monsterpunten te kunnen interpreteren, zijn de milieuvariabelen in de analyse meegenomen als zogenoemde 'supplementaire variabelen'. Dit wil zeggen dat de ligging van de monsterpunten in het ordinatiediagram alleen bepaald wordt door de macro-invertebratensamenstelling en niet door de milieuvariabelen, maar dat deze wel in het diagram geprojecteerd worden op basis van hun waarde op de verschillende monsterpunten.

4.4 Resultaten

Temperatuurmonitoring

Gedurende vijf weken in juni en juli 2023 werden de water- en luchttemperatuur in het gebied gemeten (Figuur 4.2 A en B, Figuur 4.3). Op locatie L2 was de watertemperatuur zeer stabiel met een gemiddelde van 10,0°C ($\pm 0,04^\circ\text{C}$). Op locaties L17, L11 en L9 was de variatie in temperatuur gering. Op andere locaties was een sterkere afhankelijkheid van de luchttemperatuur te zien: op locatie L4, L10 en L12 was zowel de gemiddelde temperatuur hoger en de variatie daarin groter (L12: $14,9 \pm 1,4^\circ\text{C}$).



Figuur 4.2 **A.** Water- en luchttemperatuur voor de periode 12-20 juni 2023 op monitoringslocaties in de Motketel. Voor ligging locaties, zie Figuur 4.3. **B.** Selectie uit figuur A, water- en luchttemperatuur voor de periode 12-20 juni 2023 op een selectie van nabij liggende monitoringslocaties in de Motketel.

Monitoring omgevingsvariabelen

De sprengen liggen in een bos met een gesloten bladerdek en zijn daardoor sterk beschaduwd. Ook is er veel bladmateriaal in de sprengen aanwezig (Tabel 4.2). De sprengen liggen 1 tot 2 m onder maaiveld en hebben een breedte van nog geen 1,0 tot 4,5 m. De waterdiepte is overal gering (4-17 cm diep). Over het algemeen is de concentratie nutriënten in het water van de sprengen zeer laag. De waarden liggen binnen de grenswaarden voor een goede ecologische toestand op basis van de KRW-maatlat voor permanente langzaam stromende laaglandbovenlopen op zand (R4a; Van der Molen et al., 2024). De zuurstofconcentratie, evenals de stroomsnelheid van het water, varieert sterk tussen locaties. Op een aantal locaties waren er zichtbare indicaties van grondwateruittreding. Naast een roestkleur (lokaal dan wel verspreid over de gehele watergang) waren er op sommige plekken zandvulkaantjes te zien waar sterke grondwateruittreding aanwezig was (Figuur 4.1).



Figuur 4.3 Gemiddelde water- en luchttemperatuur (kleur) en standaarddeviatie (grootte cirkel) op de meetpunten in de Motketel.

Tabel 4.2 Milieugegevens van de meetlocaties in de Motketel, gemeten op 7 juni 2023. Het betreft eenmalige metingen, met uitzondering van de temperatuurmetingen, die een gemiddelde van een continue meting over de periode 7 juni t/m 10 juli weergeven.

	Temperatuur gemiddeld (°C)	Temperatuur sd (°C)	Stroomsnelheid (cm/s)	[DO]	Geleidbaarheid (µS/cm)	pH	Breedte (cm)	Diepte (cm)	[NO ₂ +NO ₃] (mg/L)	[PO ₄] (mg/L)	[Ca] (mg/L)	[Cl] (mg/L)	IR	Hout (%)	Droogval (%)	CPOM (%)	FPOM (%)	Zand (%)	Grind (%)
L1	11.4	0.6	6	6.8	131	6.9	180	15	0.2	0.01	12.6	10.3	0.6	0	0	100	0	0	0
L2	10	0	0	1	159	7.1	320	5	0	0.01	11.5	10.3	0.5	0	0	10	0	90	0
L3	11.6	0.6	6	7.4	148	7.6	70	4	0.9	0.01	14.6	12.7	0.5	5	0	40	0	50	5
L4	13.1	1.3	5	5.5	125	6.9	170	2	0.2	0.026	13.1	10.2	0.6	10	50	50	10	30	0
L5	12.2	0.9	4	8.2	140	7.2	220	14	1.2	0.01	13	12.7	0.5	10	0	90	0	0	0
L6	11.5	0.8	0	5.5	141	6.6	280	6	0.5	0.01	14.3	11.2	0.6	0	0	70	30	0	0
L7	11.5	0.7	0	4.4	139	6.7	280	10	0.4	0.01	12.7	11.7	0.5	0	0	70	30	0	0
L8	12.3	1	7	7.4	140	6.6	150	9	1.2	0.01	13.5	13.1	0.5	5	0	50	0	40	5
L9	10.7	0.3	0	2.2	136	6.8	180	7	0	0.01	15.7	10.8	0.6	5	0	95	0	0	0
L10	12.9	0.9	2	2.9	130	6.9	140	2	0	0.01	15.1	10.6	0.6	0	50	50	0	50	0
L11	11.1	0.4	2	5.1	129	6.9	450	12	0.1	0.01	14.5	9.5	0.6	0	0	100	0	0	0
L12	14.9	1.4	0	2.6	141	6.8	90	8	0	0.057	14.5	9.9	0.6	0	20	100	0	0	0
L13	11.9	0.8	11	4.6	128	6.8	210	8	0.1	0.01	13.9	9.3	0.6	0	20	100	0	0	0
L14	11.5	0.7	4	3.2	129	6.9	130	10	0.3	0.01	13.7	9.7	0.6	5	0	30	15	60	0
L15	11.6	0.7	2	5.2	134	7.3	270	12	1.2	0.01	14	10.1	0.6	5	0	80	0	10	5
L16	11.6	0.7	0	4	135	7.7	440	17	1.2	0.01	14	10.2	0.6	0	0	100	0	0	0
L17	10.5	0.3	5	1.4	167	7.4	320	11	0	0.01	12.3	10.8	0.5	0	0	100	0	0	0
T1	16.5	3.8																	
T2	17.0	4.6																	

Patronen in samenstelling van de macrofaunagemeenschap en de relatie met milieumomstandigheden

In totaal zijn er 62 taxa gevonden in de sprengen. Het aantal taxa per locatie was beperkt, met een minimum van 3 taxa op locatie L2 en een maximum van 19 taxa op locatie L10 (Figuur 4.4).

Op locaties L1, L3, L5, L8, L15 en L16 zijn relatief meer stromingsminnende soorten gevonden (Tabel 4.3), waaronder de slijkvlieg *Sialis fuliginosa*, de dansmug *Rheocricotopus fuscipes*, de kokerjuffers *Sericostoma personatum* en *Plectrocnemia conspersa*, en de platworm *Polycelis felina*. Op deze en een aantal andere locaties (locaties L3, L4, L5, L8, L10, L11, L14 en L15) bevinden zich ook soorten met een voorkeur voor relatief lage watertemperaturen, waaronder de dansmuggen *Heterotrissocladius marcidus* en *Brillia bifida*. Voor de metric 'Aantal taxa met koudstenotherme temperatuurrange' had geen van de gevonden soorten een indicatiewaarde. Er zijn geen grote verschillen in focustemperatuur gevonden, al herbergen de locaties met taxa met de laagste focustemperatuur ook de taxa met de hoogste specificiteit voor temperatuur en dus de gevoeligheid voor temperatuurschommelingen. In totaal zijn er op drie locaties taxa gevonden met 'grondwaterindicatie' (locaties L1, L5, L8), namelijk de steenvlieg *Nemurella pictetii* en de kokerjuffer *Sericostoma personatum*. Hierbij valt op dat juist op de locatie waar grondwater direct zichtbaar uittreedt (L2) geen grondwater indicerende taxa zijn gevonden. Er werden relatief meer taxa met een preferentie voor de stromingszones bron(loop)/bovenloop of bronmilieu gevonden op locaties L3, L5 en L8 (bijvoorbeeld de soorten *Polycelis felina* en *Sialis fuliginosa*). Geen enkele van de aanwezige taxa heeft tolerantie voor droogte. Affiniteit met α -mesosaprobie en polysaprobie kan duiden op zuurstofstress/toxiciteit. Op locatie L9 is deze score relatief hoog, op locatie L8 relatief laag. Taxa met relatief lage preferenties voor stroming zijn te vinden op locaties L2, L9 en L13. Wanneer het water op deze locaties wel stroomt, kan dit tevens duiden op het optreden van zuurstofstress.

Om de taxonsamenstelling van de locaties te kunnen vergelijken, is een Principal Components Analyse (PCA) uitgevoerd (Figuur 4.5 en 4.6). Deze ordinatie laat een groepering van de monsterpunten zien langs de eerste twee ordinatie-assen, die samen de helft van de totale variatie in taxonsamenstelling op de locaties verklaren. Deze assen zijn te relateren aan gemeten milieuv variabelen, die in het ordinatiediagram zijn geprojecteerd met pijlen. Deze gegevens oefenen echter geen invloed uit op de ligging van de monsterpunten in het ordinatiediagram, dat enkel op de verschillen in taxonsamenstelling is gebaseerd.

Langs de eerste ordinatie-as is een groepering van meetpunten langs een gradiënt van zuurstofconcentratie, stroomsnelheid en concentratie $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ zichtbaar en kan worden beschouwd als een gradiënt in waterkwaliteit van de sprengen. Langs de tweede ordinatie-as is een onderscheid te zien tussen meetpunten met een relatief hoog elektrisch geleidingsvermogen (EGV), een lage watertemperatuur en kleine temperatuurvariatie versus meetpunten met een hogere temperatuur, grotere variatie in temperatuur en een lagere EGV. In deze laatste groep wordt ook meer organisch materiaal gevonden op de bodem van de sprengen. Hier lijkt het onderscheid te worden bepaald door locaties waar grondwater uittreedt en de temperatuur buffert, oftewel een grondwatergradiënt.

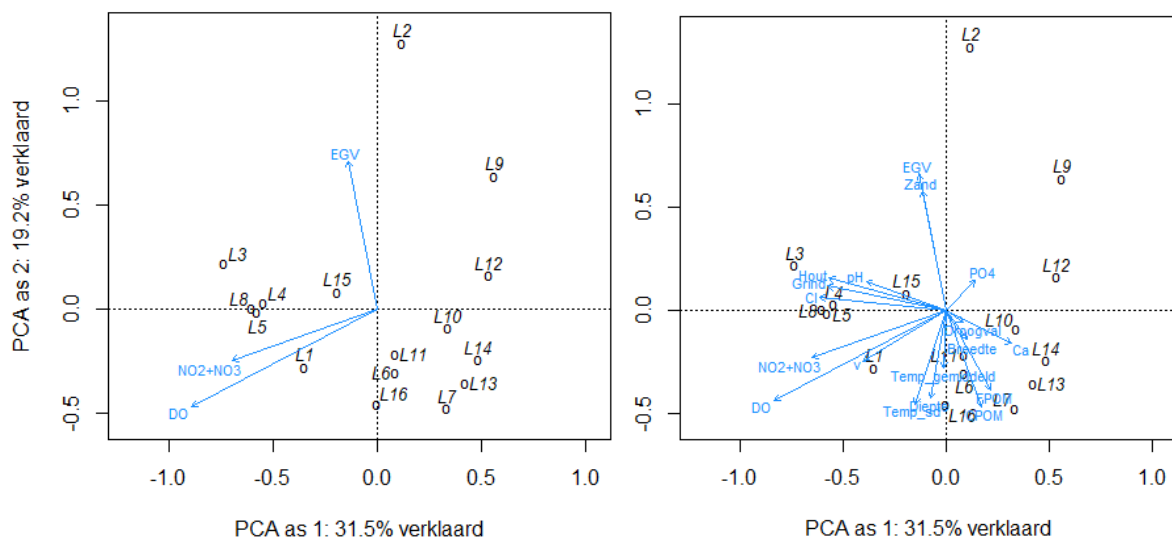
Meetpunt L2 wijkt af in taxonsamenstelling. Hier werden maar weinig taxa gevonden, waarschijnlijk vanwege de lage zuurstofconcentraties aldaar. Dit is te verklaren door een sterke grondwatervoeding op deze locatie. Grondwater treedt immers zuurstofloos uit in de sprengkop en moet door diffusie uit de lucht worden aangereikt. Een dunne waterfilm en stroming (turbulentie) versnellen dit proces.



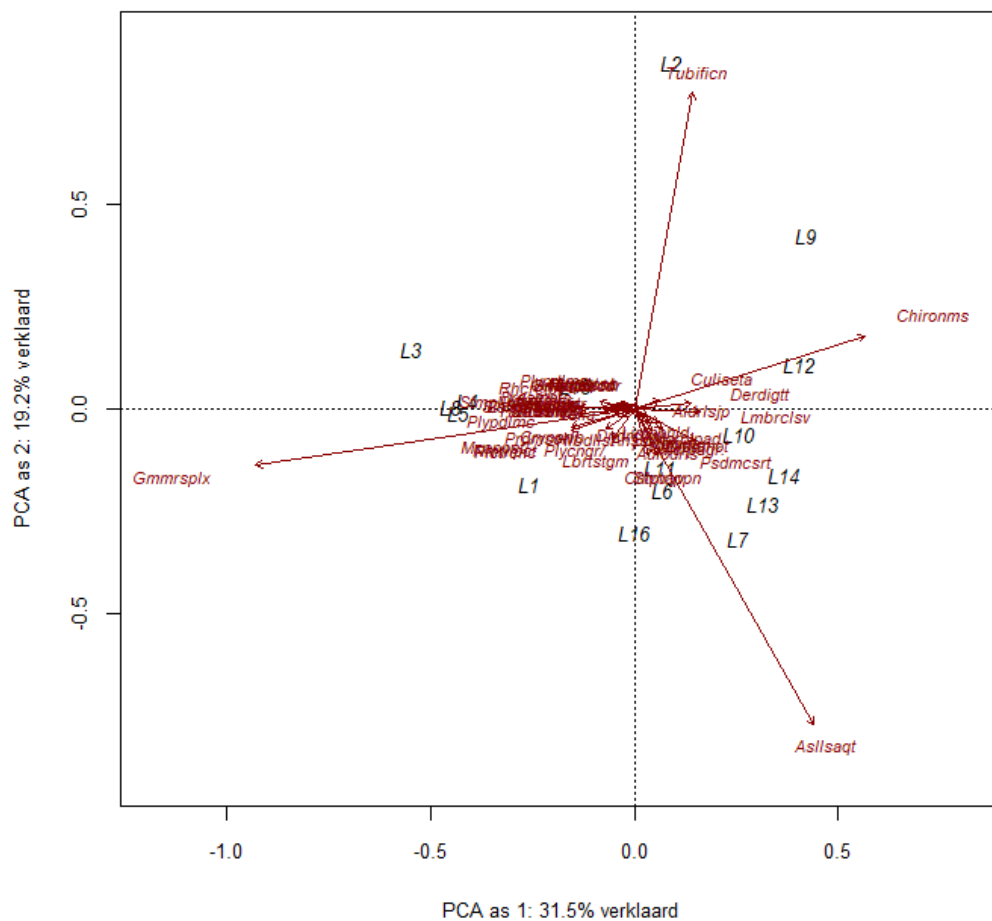
Figuur 4.4 Totaal aantal macrofaunataxa per meetpunt in de Motketel. Locatie L17 is niet weergegeven, hier zijn geen taxa gevonden.

Tabel 4.3 Gemiddelde milieupreferentiescores macrofauna meetpunten (0-1, tenzij anders vermeld) op basis van aanwezigheid van soorten waarvan preferentiedata bekend was. Preferentiescores afkomstig uit de autoecologielijst (Verberk et al., 2012) en de freshwaterecology-database (Schmidt-Kloiber & Hering, 2015). Voor de parameter 'Droogteresistentievorm aanwezig' en wanneer 'nvt' vermeld is, waren voor geen van de gevonden soorten preferentiedata beschikbaar.

Locatie	Totaal aantal taxa	Preferente stromingszone: Bron(loopje)/ bovenloop	Aantal taxa met koudstenotherme temperatuurrange	Temperatuurpreferentie tot 10°C	Focus-temperatuur (°C)	Temperatuurspecificiteit (0 -10)	Aantal taxa met grondwaterindicatie	Voorkomen in zeer ondiep/brommilieu	Droogvalindicatie 6-12 weken	Stromingspreferentie	Saprobie
L1	5	0.2	0	0	16.2	1.7	1	0.3	0.0	0.5	0.3
L2	3	0.3	0	nvt	16.5	0.6	0	0.1	0.0	0.2	0.5
L3	16	0.2	0	0.1	16.4	1.2	0	0.4	0.0	0.6	0.3
L4	15	0.2	0	0.1	16.6	1.5	0	0.2	0.0	0.4	0.4
L5	16	0.4	0	0.2	15.6	1.3	2	0.3	0.0	0.6	0.3
L6	9	0.1	0	nvt	16.8	0.4	0	0.2	0.0	0.4	0.3
L7	7	0.1	0	nvt	17.0	0.3	0	0.1	0.0	0.4	0.3
L8	15	0.3	0	0.1	15.7	1.9	1	0.4	0.0	0.5	0.2
L9	6	0.1	0	nvt	17.0	0.3	0	0.1	0.0	0.3	0.7
L10	19	0.3	0	0.1	16.4	0.6	0	0.3	0.0	0.4	0.5
L11	10	0.2	0	0.1	16.6	0.5	0	0.1	0.0	0.4	0.5
L12	6	0.2	0	nvt	16.6	0.4	0	0.2	0.0	0.3	0.5
L13	7	0.1	0	nvt	16.6	0.8	0	0.1	0.0	0.2	0.5
L14	12	0.2	0	0.1	16.5	0.6	0	0.1	0.2	0.4	0.5
L15	16	0.2	0	0.1	16.4	0.6	0	0.1	0.2	0.5	0.4
L16	5	0.1	0	nvt	17.0	0.3	0	0.2	0.0	0.5	0.3
Gehele gebied	62	0.3	0	0.1	16.1	1.4	2	0.2	0.1	0.4	0.4
Totaal aantal taxa waarvoor preferenties bekend		28	18	28	25	25	36	25	34	32	35



Figuur 4.5 Principal Components Analysis (PCA) ordinatie-as 1 en as 2 op basis van de taxonsamenstelling van de monsterpunten in de Motketel. De bijbehorende supplementaire milieuv variabelen van de locaties zijn aangegeven met pijlen, zoals aandeel bedekking substraten en de stroomsnelheid, waarbij de richting van de pijl een toename van de variabele op de monsterpunten laat zien, corresponderend met een verandering in taxonsamenstelling. Enkel significante milieuv variabelen met $p > 0.05$ zijn in de eerste figuur getoond, in de tweede figuur zijn alle milieuv variabelen getoond.



Figuur 4.6 Principal Components Analysis (PCA) ordinatie-as 1 en as 2 op basis van de taxonsamenstelling van de monsterpunten in de Motketel. De bijbehorende taxa zijn aangegeven met pijlen, waarbij de richting van de pijl een toename van het aantal waarnemingen van het taxon op de monsterpunten laat zien.

5 Data-analyse metrics grondwateruittreding

5.1 Introductie

In de literatuurstudie (hoofdstuk 3) is een shortlist aan metrics geformuleerd die in een veldsituatie zijn toegepast. Om verder te verkennen hoe metrics gebaseerd op de macrofaunagemeenschap kunnen worden toegepast voor het in kaart brengen van (het herstel van) grondwaterinvloed binnen integraal beekdalherstel, is daarnaast gezocht naar een grootschaliger toepassing op monitoringsdata van waterschappen. Daarbij werd de volgende onderliggende vraag gesteld: welke combinaties en vormen van op de macrofaunagemeenschap gebaseerde metrics kunnen worden gebruikt om grondwaterinvloed aan te tonen?

5.2 Methode

De in hoofdstuk 3 geselecteerde metrics worden gelinkt aan bestaande kennis over grondwatergevoede beken bij waterschappen en de bestaande macrofaunamonitoringsdata. Zo kan worden getoetst welke metrics hoger scoren op meetpunten die in waterschapsdata zijn opgenomen als (sterk) beïnvloed door grondwater.

5.2.1 Dataverzameling

De toepasbaarheid van de geselecteerde metrics voor het in kaart brengen van (het herstel van) grondwaterinvloed binnen integraal beekdalherstel wordt getoetst door bestaande monitoringsdata te analyseren.

Daarvoor zijn data nodig over de samenstelling van macrofaunagemeenschappen en kennis over de aanwezigheid van grondwateruittreding op de locaties van meetpunten. De macrofaunadata die zijn gebruikt, zijn afkomstig van het macrofaunameetnet van de Nederlandse waterschappen. Voor informatie over grondwateruittreding is bij zeven waterschappen door wiens beheergebied beken stromen, navraag gedaan van bestaande kennis over door grondwaterbeïnvloede beken in de desbetreffende beheergebieden. Daarbij is de vraag gesteld of er van de macrofaunameetpunten die tussen 2011 en 2021 zijn bemonsterd, een inschatting kon worden gegeven voor de mate van grondwatervoeding.

Gegevens over grondwateruittreding bleken niet of nauwelijks beschikbaar, veel van de beschikbare data waren gebaseerd op expert judgement of informatie over de droogval van beken. Van vier van deze waterschappen waren er op dat moment voldoende data om een analyse uit te voeren.

5.2.2 Dataverwerking

Macrofaunadata uit de periode 2011-2018 zijn gebruikt. De data zijn taxonomisch afgestemd op de TWN-lijst (Taxa Waterbeheer Nederland). Aantallen zijn log-getransformeerd. Data uit de periode vanaf 2019 zijn niet meegenomen om eventuele effecten van de extreme droogte van 2019 en 2020 uit te sluiten. Afhankelijk van de aangeleverde gegevens over grondwateruittreding/droogval zijn de meetpunten van macrofaunagemeenschappen op een van de volgende manieren geselecteerd:

- Als er shapefiles zijn aangeleverd met de droogvaldata, zijn deze droogvalscores gelinkt aan het dichtstbijzijnde macrofaunameetpunt.
- Als namen van trajecten zijn aangeleverd, zijn meetpunten geselecteerd die de naam van dat traject dragen.
- Als er per meetpunt een inschatting is gemaakt, zijn desbetreffende meetpunten op naam gekoppeld aan de macrofaunadata, of waren macrofaunadata al meegeleverd.

5.2.3 Analyse

Voor elk van de aangeleverde locaties is de score van de eerder geselecteerde metrics berekend (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Geselecteerde metrics voor milieupreferenties.

Milieupreferentie	Indeling	Bron
Preferente stromingszone: Bron(loopje)/bovenloop	Fuzzy coding 0-10	Moog, 2017
Aantal taxa met koudstenotherme temperatuurrange	Binaire	Euro-limpacs consortium, 2006; Graf et al., 2006; Schmidt-Kloiber et al., 2008
Temperatuurpreferentie tot 10°C	Fuzzy coding 0-10	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Focustemperatuur	Nvt	Halle et al., 2016
Temperatuurspecificiteit	Score 0 (niet specifiek) – 10 (zeer specifiek)	Halle et al., 2016
Aantal taxa met grondwaterindicatie	Binaire	Working Group Aquatic Ecology (2016)
Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012
Droogvalindicatie 6-12 weken	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012
Droogte-resistentievorm aanwezig	Binaire	Schmidt-Kloiber et al., 2008
Stromingspreferentie	Fuzzy coding 0-10	Verberk et al., 2012

Als er op een meetpunt over de periode van 2011-2018 meerdere malen macrofauna is bemonsterd, is de gemiddelde metric-score van de bemonsteringen voor het meetpunt gerapporteerd. Om te kijken of de metrics significant verschillend scoren wanneer ze worden toegepast op locaties met verschillende mate van grondwaterinvloed, zijn de metric-scores van de meetpunten van verschillende groepen grondwaterbeïnvloeding per waterschap vergeleken met behulp van een non-parametrische Kruskal-Wallis-test. Indien er meer dan twee groepen zijn, is een significant verschil bepaald met een Dunn post-hoc test. Significante verschillen tussen groepen zijn aangegeven met een verschillende letter boven de betreffende boxplot.

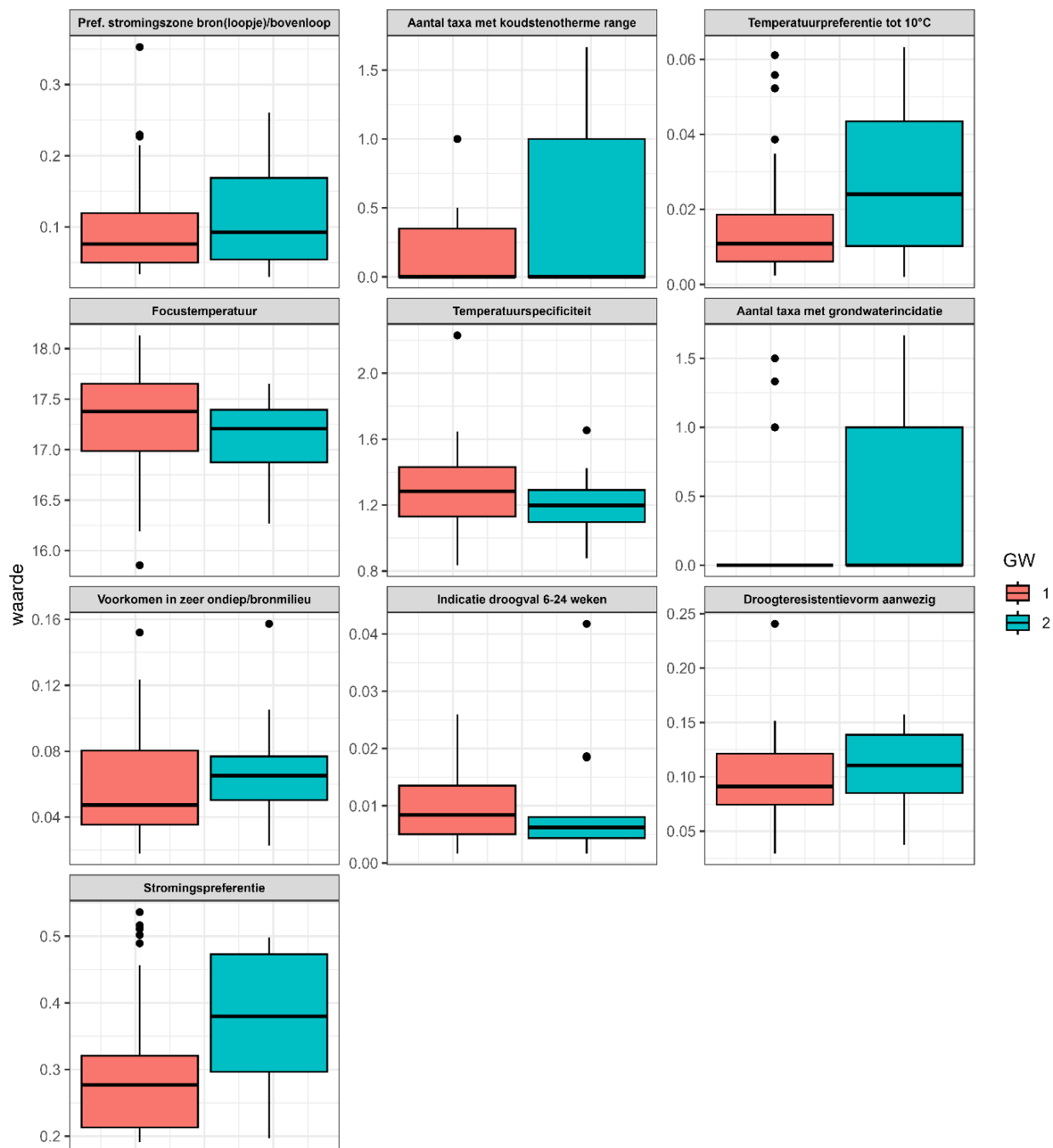
Met behulp van een NMDS wordt in beeld gebracht hoe de soortensamenstelling als geheel verschilt tussen de meetpunten en of er een bepaalde clustering op basis van deze soortensamenstelling optreedt. Door de meetpunten te kleuren aan de hand van de groepen van grondwaterbeïnvloeding, kan dus worden ingezien of dit potentieel samenhangt met de soortensamenstelling.

5.3 Resultaten

Waterschap Rijn en IJssel

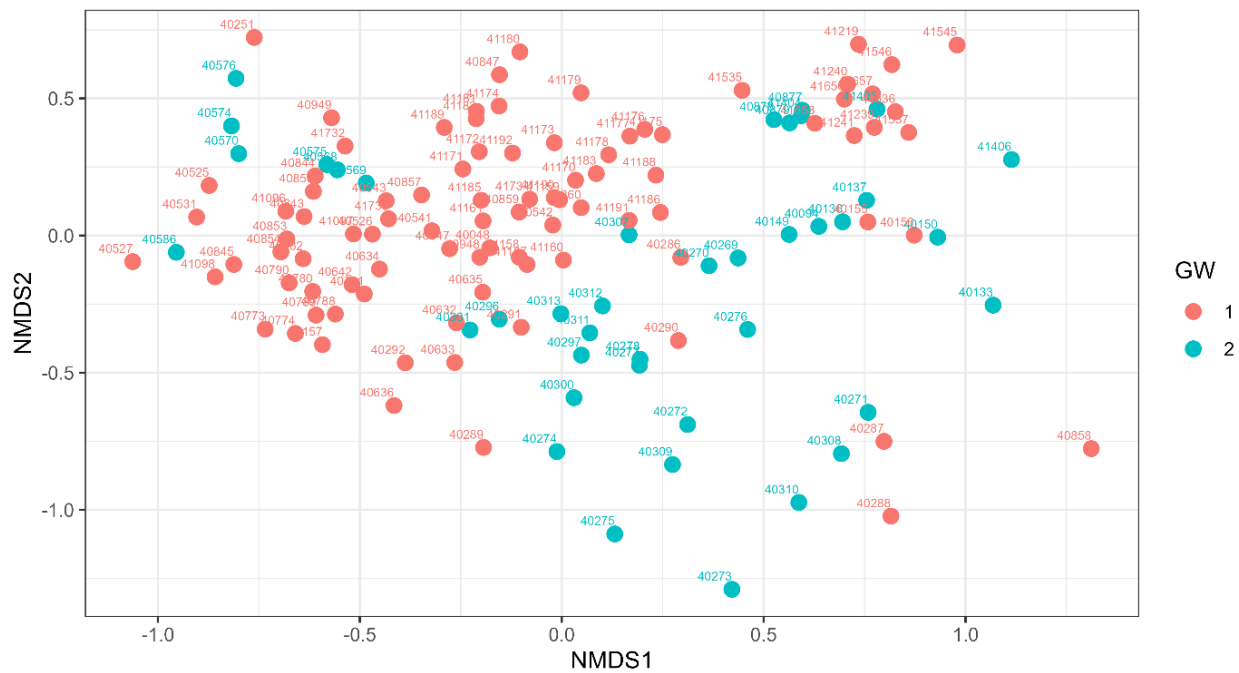
Waterschap Rijn en IJssel leverde shapefiles aan met de locaties van waterlichamen en een inschatting van wateraanvoer en afvoer van deze waterlichamen. Voor deze analyse is uitgegaan van grondwaterinvloed als er geen (externe) wateraanvoer in het waterlichaam was, en er meestal wel waterafvoer was. In alle andere gevallen zijn waterlichamen ingedeeld als niet door grondwater beïnvloed. Macrofaunameetpunten in het beheergebied zijn gekoppeld aan het dichtstbijzijnde waterlichaam om ook een grondwater-invloedscore aan de meetpunten toe te kennen (1= grondwaterinvloed afwezig, 2= grondwaterinvloed aanwezig). De analyse is gebaseerd op 41 meetpunten.

Geen van de metrics toont een significant verschil op basis van de aangegeven grondwaterafhankelijkheid van de meetpunten van Waterschap Rijn en IJssel. Metrics zoals het aantal taxa met grondwaterindicatie en de temperatuur- en stromingspreferentie laten wel een trend zien die verwacht zou worden.



Figuur 5.1 Boxplots op basis van vergelijking meetpunten met en zonder grondwaterinvloed op basis van de tien geselecteerde metrics. 1= grondwaterinvloed afwezig, 2= grondwaterinvloed aanwezig.

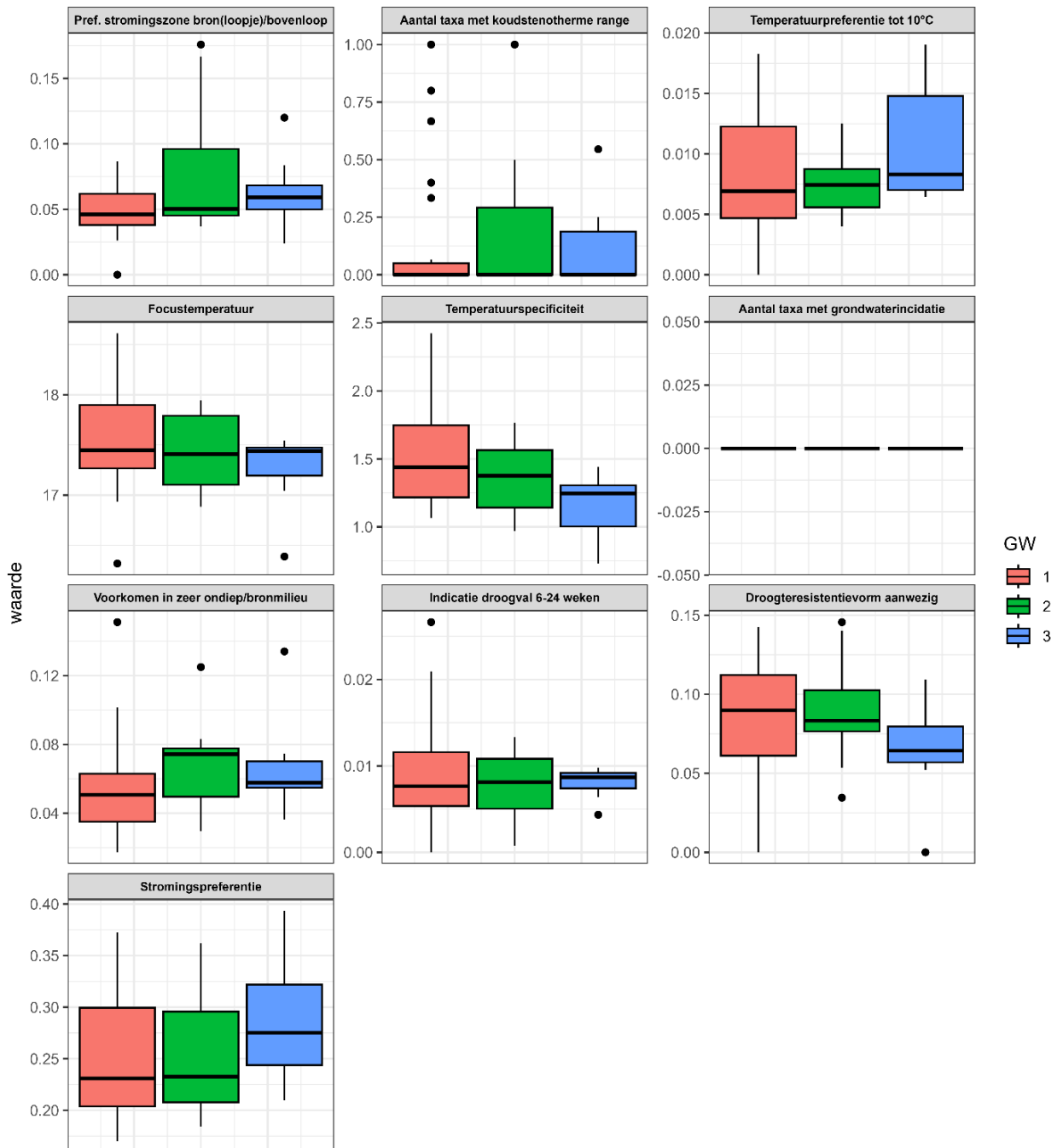
De NMDS-plot laat zien dat er op basis van de macrofaunasamenstelling geen duidelijke splitsing is tussen de grondwaterafhankelijke en niet-grondwaterafhankelijke meetpunten.



Figuur 5.2 NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunasamenstelling van de meetpunten in Waterschap Rijn en IJssel. 1= grondwaterinvloed afwezig, 2= grondwaterinvloed aanwezig.

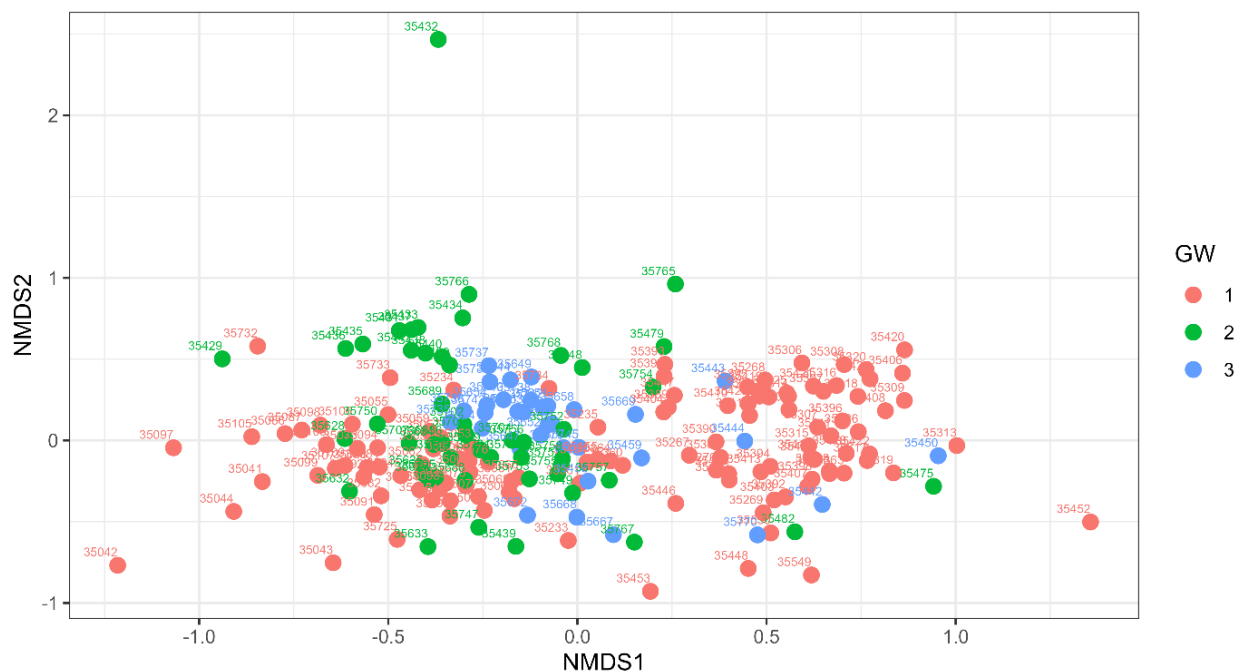
Data over grondwaterinvloed van verschillende stromende wateren is afgeleid op basis van een samenvattend overzicht van beken met afvoer (aangeduid met code 3), beperkte afvoer (2), geen afvoer of droogval (1) in een droog jaar. De aangeleverde oppervlaktewateren zijn via GIS gekoppeld aan gemonitorde macrofauna-metpunten. De metric-analyse is gebaseerd op 45 meetpunten.

Er zijn geen significante verschillen te zien tussen de op grondwaterinvloed gebaseerde groepen bij de metrics.



Figuur 5.3 Boxplots op basis van vergelijking meetpunten met en zonder grondwaterinvloed op basis van de tien geselecteerde metrics. Legenda: 1 = geen afvoer of droogval, 2 = beperkte afvoer, 3 = meetpunten met afvoer in droog jaar.

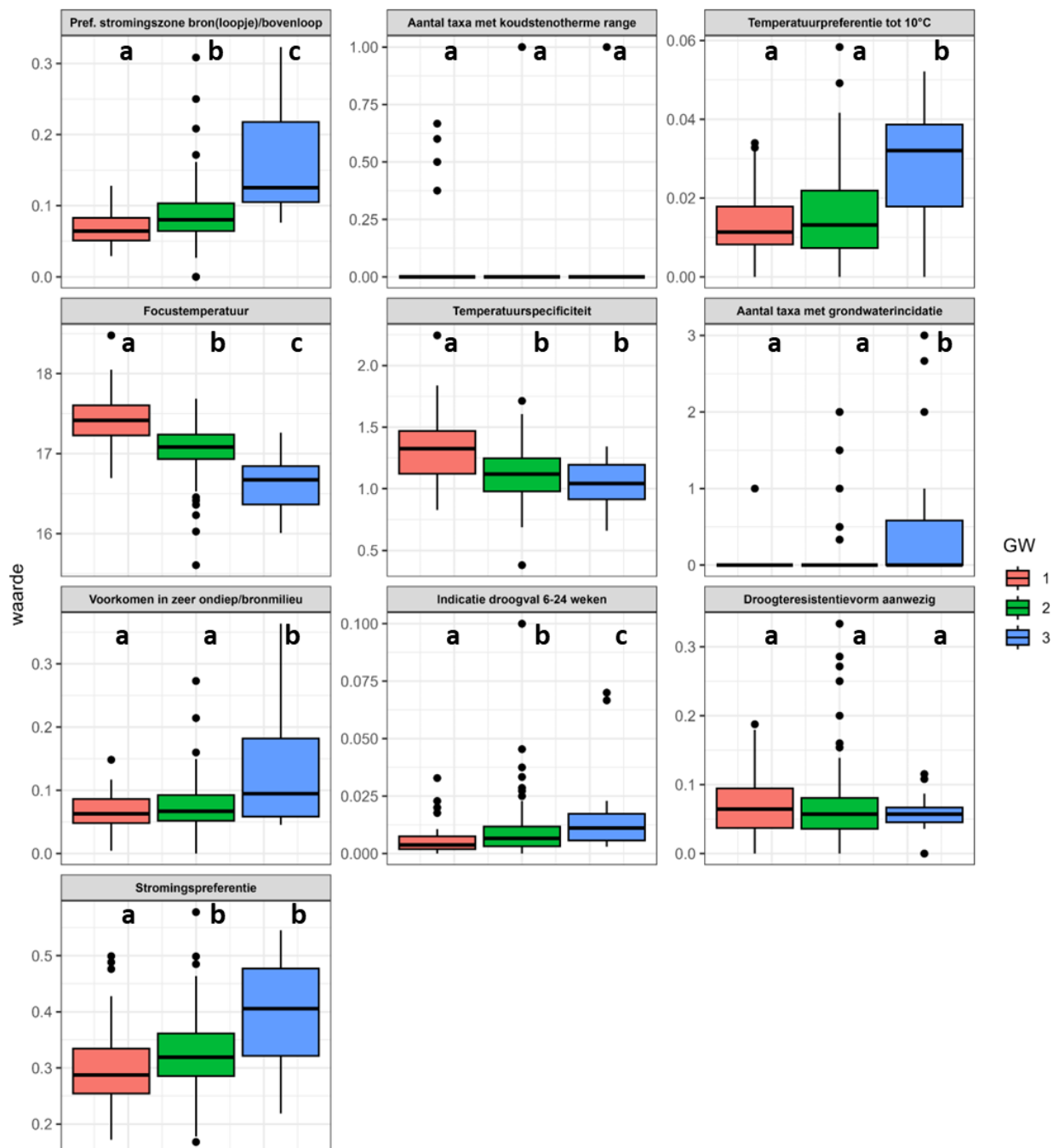
De NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunagemeenschap laten ook geen duidelijke groepering zien van de verschillende groepen grondwaterbeïnvloeding (Figuur 5.5).



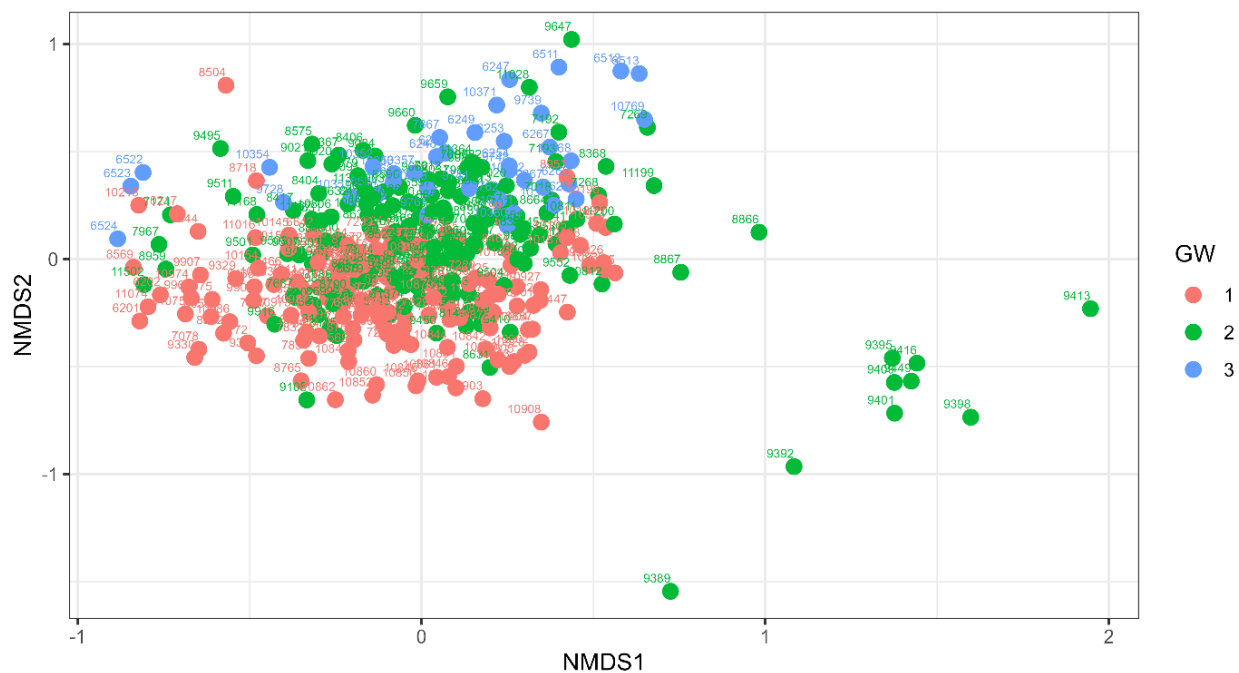
Figuur 5.4 NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunasamenstelling van de meetpunten in Waterschap Hunze en Aa's. Legenda: 1 = geen afvoer of droogval, 2 = beperkte afvoer, 3 = meetpunten met afvoer in droog jaar.

Waterschap Limburg

Negen van de tien metrics scoren significant verschillend voor de drie groepen locaties op basis van grondwaterinvloed (1 = geen grondwaterinvloed, 2 = weinig grondwaterinvloed, 3 = veel grondwaterinvloed). Alleen de metrics 'droogteresistentie aanwezig' en 'aantal taxa met koudstenotherme range' laten geen verschil zien voor de locaties die niet, weinig of veel zijn beïnvloed door grondwater. Verschillen zijn het grootst tussen groep 1 en 3, maar ook verschillen tussen 2 en 3 zijn vaak significant, wat aantoont dat deze metrics ook gevoelig zijn voor verschillen tussen weinig en veel grondwaterinvloed van meetpunten in Waterschap Limburg. Ook de NMDS-ordinatieplot toont, op enkele uitschieters na, een lichte groepering, met name tussen groepen met grondwaterinvloed (2-3) en de groep zonder grondwaterinvloed (1). De metric-analyse is gebaseerd op 178 meetpunten.



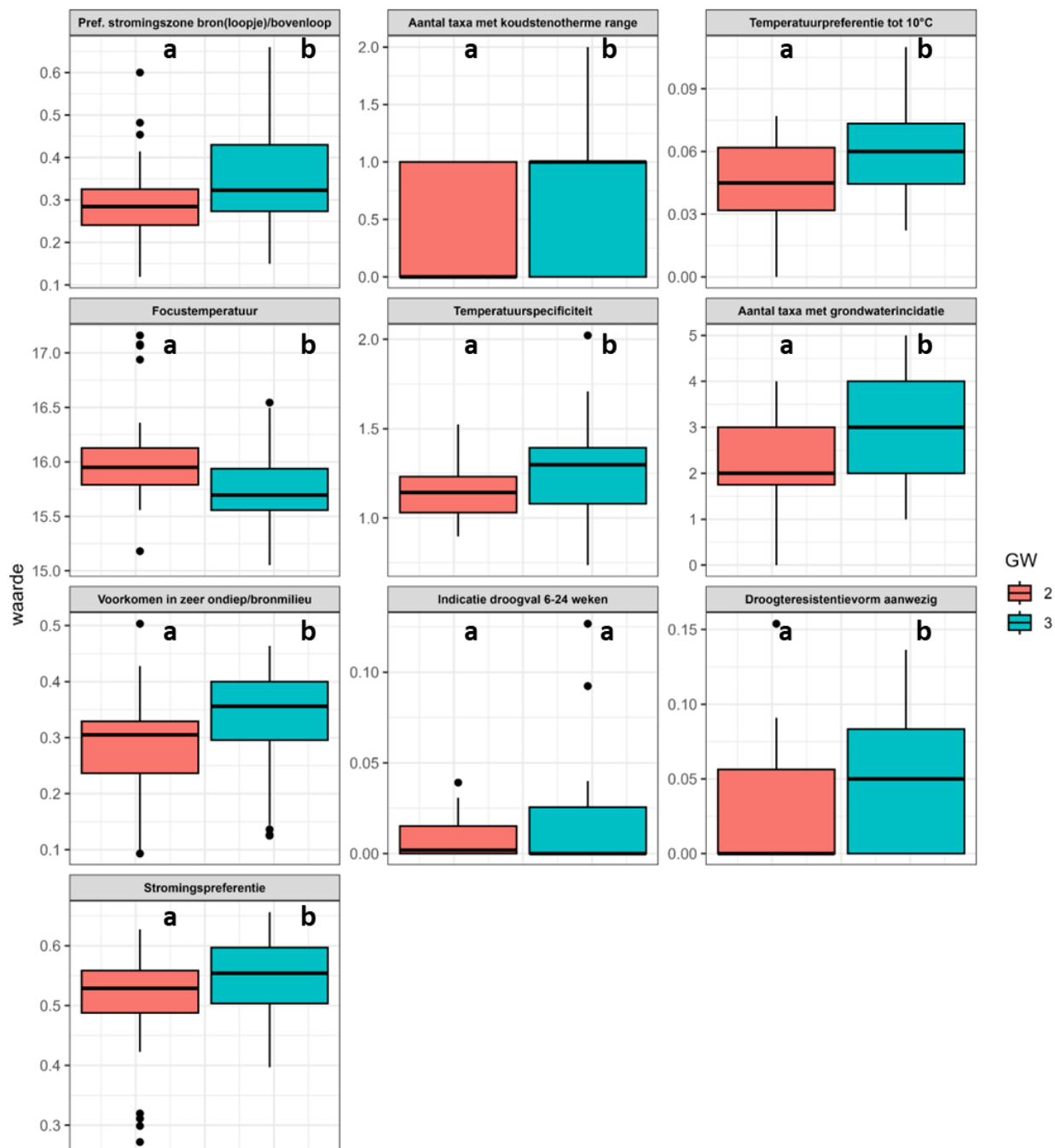
Figuur 5.5 Boxplots op basis van vergelijking meetpunten met en zonder grondwaterinvloed op basis van de tien geselecteerde metrics. Legenda: 1 = geen grondwaterinvloed, 2 = weinig grondwaterinvloed, 3 = veel grondwaterinvloed.



Figuur 5.6 NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunasamenstelling van de monsters in Waterschap Limburg. Legenda: 1 = geen grondwaterinvloed, 2 = weinig grondwaterinvloed, 3 = veel grondwaterinvloed.

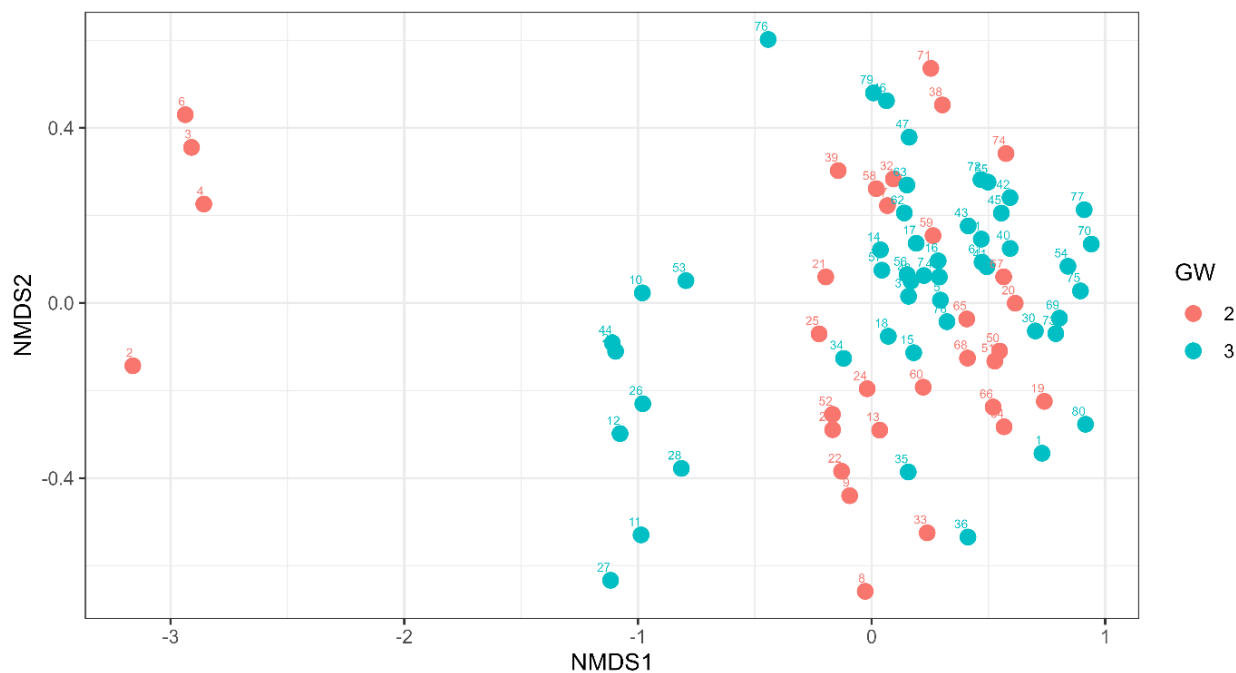
Waterschap Vechtstromen

De meetpunten die zijn aangeleverd door Waterschap Vechtstromen staan onder invloed (2) of grote invloed (3) van grondwater (data o.b.v. expert judgement). Ook hier laten negen van de tien metrics een significant verschil zien tussen meetpunten met verschillende grondwaterinvloed. Enkel de metric 'Indicatie droogval 6-12 weken' verschilt niet significant tussen de twee groepen. Alle ander metrics lijken dus ook hier gevoelig voor verschillen in de mate van grondwaterinvloed. Interessant genoeg valt de metric 'Droogteresistentievorm aanwezig' tegenovergesteld uit ten opzichte van wat werd verwacht, met een hogere score in de groep meetpunten met grote grondwaterinvloed. Dit indiceert waarschijnlijk met name dat droogteresistentie minder geschikt is als negatief indicerende metric voor grondwaterinvloed, zeker als de te vergelijken groepen alle onder grondwaterinvloed staan. Daarnaast moet worden opgemerkt dat de scores van deze metric in beide groepen erg laag zijn. Om de bruikbaarheid van deze metric beter te kunnen beoordelen, is het gewenst om ook de score voor droogvallende meetpunten mee te nemen. De metric-analyse is gebaseerd op 81 meetpunten.



Figuur 5.7 Boxplots op basis van vergelijking meetpunten met en zonder grondwaterinvloed op basis van de tien geselecteerde metrics. Legenda: 2 = locaties onder invloed van grondwater, 3 = locaties onder grote invloed van grondwater.

De NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunagemeenschappen laat geen duidelijke groepering zien tussen de twee grondwaterinvloed-groepen.



Figuur 5.8 NMDS-ordinatieplot op basis van de macrofaunasamenstelling op de meetpunten in Waterschap Vechtstromen. Legenda: 2 = locaties onder invloed van grondwater, 3 = locaties onder grote invloed van grondwater.

5.4 Toepasbaarheid van de metrics

Van de tien getoetste metrics zijn er zes die gevoelig zijn voor grondwaterinvloed of geen effect laten zien afhankelijk van het waterschap. Dat zijn: 'Preferente stromingszone bron(loopje)/bovenloop', 'Temperatuurpreferentie tot 10 °C', 'Focustemperatuur', 'Aantal taxa met grondwaterindicatie', 'Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu' en 'Stromingspreferentie'. De andere vier metrics tonen geen effect of corresponderen niet altijd met de verwachting op basis van de theorie.

Ook komt duidelijk naar voren dat de gevoeligheid van de metrics sterk afhankelijk is van de data per toepassingsgebied. Waar de metrics bij Waterschap Limburg en Waterschap Vechtstromen sterk reageren op de grondwaterbeïnvloedingsklassen, zijn er bij Waterschap Rijn en IJssel en Waterschap Hunze en Aa's geen effecten te zien.

Tabel 5.2 Overzicht van gevoeligheid van metrics op de datasets van de vier waterschappen. Een * indiceert een significant verschil in metric-score tussen de verschillende groepen o.b.v. grondwaterinvloed. Een + of - indiceert of het verschil in metric-scores tussen de groepen wel (+) of niet (-) voldoet aan de verwachting o.b.v. de theoretische achtergrond. Een 0 geeft aan dat de metric-scores niet significant verschillen tussen de meetpunten met verschillende grondwaterinvloeden.

Metric	Waterschap Rijn & IJssel	Waterschap Hunze & Aa's	Waterschap Limburg	Waterschap Vechtstromen
Preferente stromingszone: bron(loopje)/bovenloop	0	0	+	+
Aantal taxa met koudstenotherme temperatuurrange	0	0	0	+
Temperatuurpreferentie tot 10 °C	0	0	+	+
Focustemperatuur	0	0	+	+
Temperatuurspecificiteit	0	0	-	+
Aantal taxa met grondwaterindicatie	0	0	+	+
Voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu	0	0	+	+
Droogvalindicatie 6-12 weken	0	0	-	0
Droogteresistentievorm aanwezig	0	0	0	-
Stromingspreferentie	0	0	+	+

5.5 Discussie

Zes van de tien gekozen metrics laten een duidelijke gevoeligheid zien voor grondwaterinvloed op de meetpunten in de verschillende beheergebieden. De ordinatie-analyses van de gehele macrofaunagemeenschappen laten echter een veel minder duidelijk patroon zien. Dit onderbouwt de methode van de metrics-analyse, en laat zien dat voor het indiceren van grondwaterinvloed het een betere aanpak is om te kijken naar specifieke eigenschappen van soorten dan naar verschillen in samenstelling van de soortengemeenschap op basis van ordinaties. Met name de positief indicerende metrics toonden het verwachte effect, terwijl de verschillende negatief indicerende metrics voor droogteresistentie een wisselend of niet verwacht beeld gaven op basis van de meetpuntdata.

De verschillen die de metrics aantonen tussen grondwaterinvloed-klasse 2 en 3, klassen die 'deels' of 'sterk' onder grondwaterinvloed staan, tonen ook aan dat deze 'trait-based'-analyse gevoelig zou kunnen zijn om verschillen in de mate van grondwaterinvloed aan te tonen.

De verschillende patronen in metric-scores tussen de waterschappen kan enerzijds verklaard worden door de hoeveelheid aangeleverde meetpunten en anderzijds door de typologie van de meeste wateren in de desbetreffende waterschappen.

Een grote beperking bij de uitvoering van de huidige analyse van de toepasbaarheid van de metrics was dat bij de meeste meetlocaties de mate van grondwaterbeïnvloeding op basis van expert judgement of droogval is gemaakt. Hierdoor is er geen sprake van een gestandaardiseerde, directe methode van bepaling van grondwaterinvloed. Het opzetten van een gestandaardiseerde methode voor het bepalen van grondwaterinvloed in oppervlaktewateren is daarom essentieel om de toepasbaarheid van de onderzochte metrics beter te kunnen toetsen.

Een uitdaging bij het toetsen van de voorgestelde metrics is dat de mate van grondwaterinvloed mogelijk correleert met andere omgevingsvariabelen of dat (de verslechtering van) andere omgevingsvariabelen juist de aanwezigheid van grondwateruittrekking maskeren. Een goed beeld van de andere omgevingsvariabelen bij het bepalen van grondwaterinvloed is daarom belangrijk, zodat er waar mogelijk voor deze omgevingsvariabelen gecorrigeerd kan worden, of zodat de toetsing van de metrics enkel wordt gedaan voor locaties met gelijkende omgevingsvariabelen.

Daarnaast ontbreekt van een aanzienlijk deel van de taxa die voor kunnen komen in de macrofaunagemeenschappen de autoecologische kennis om ze een metric-score toe te kunnen delen. Een verdere ontwikkeling van deze kennis kan helpen om de toepasbaarheid van de metrics te vergroten, omdat ze op meer taxa gebaseerd kunnen worden en daarmee minder afhankelijk worden van de taxa die op dit moment de basis vormen van de metric.

Een volgende stap in de ontwikkeling van de metrics zou kunnen zijn om te onderzoeken of er een combinatie van de geteste metrics als multimetric index mogelijk is, die sterker correleert met de grondwaterinvloed van meetpunten dan de losse metrics.

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is beschreven wat mogelijkheden zijn om de effecten van grondwaterinvloed in (herstelde) beken in kaart te brengen met behulp van metrics gebaseerd op beekorganismen met een indicatiewaarde. Op basis van literatuuronderzoek zijn voor de Nederlandse context potentieel te gebruiken metrics voor het indiceren van grondwateruittrekking in boven- en middenlopen van beken geselecteerd. Deze metrics zijn toegepast in een veldsituatie en op de monitoringsdata van Nederlandse waterschappen. De onderzoeksvragen zoals omschreven in paragraaf 1.5 worden hier beantwoord.

1. Welke op de biologische gemeenschap gebaseerde metrics kunnen theoretisch worden gebruikt om grondwateruittrekking te indiceren?

Metrics voor het detecteren van grondwaterinvloed aan de hand van de macrofauna zouden in ieder geval kunnen bestaan uit de volgende soortspecifieke kenmerken:

- de preferente stromingszone bron(loopje)/bovenloop
- temperatuurpreferentie tot 10°C
- focustemperatuur
- grondwaterinvloed-indicator
- voorkomen in zeer ondiep/bronmilieu
- stromingspreferentie

Ook kenmerken die negatief indicierend zijn kunnen worden meegenomen, namelijk:

- droogte-indicatie
- droogteresistentie

Toepassing in de praktijk moet uitwijzen of deze selectie werkbaar is. Daarbij moet er worden gelet op detectiegevoeligheid, robuustheid en praktische toepasbaarheid. Tevens kunnen de geselecteerde soortspecifieke kenmerken kunnen worden gecombineerd in een *multimetric*, met als voordeel dat er een bredere detectiemogelijkheid is die meerdere parameters omvat. Ook kan deze aanpak een stabielere resultaat geven dan wanneer een enkele metric wordt toegepast en is deze door het gebruik van meer informatie uit een enkel monster kosteneffectief.

De ontwikkelde metric kan worden toegepast om de effecten van herstelmaatregelen gericht op het verbeteren van de toestroming van grondwater naar beken te kunnen detecteren alsmede bestaande koudwaterrefugia te identificeren en effectief te kunnen beheren.

Voor veel soorten zijn nog geen soortspecifieke preferentiedata en data over de relatie tussen het voorkomen van de soort en de milieuomstandigheden beschikbaar. Aanvullend autoecologisch onderzoek over de randvoorwaarden van voorkomen van indicatorsoorten is daarom nuttig.

2. Hoe kan de in het veld waargenomen macro-invertebratengemeenschap (en daarop gebaseerde metrics) gebruikt worden als indicator voor grondwateruittrekking?

In een grondwatergevoed sprengstelsel als de Motketel zou men verwachten dat op macro-invertebraten gebaseerde metrics voor grondwateruittrekking positief scoren. Dit was echter niet zonder meer het geval: op zeven van de zestien locaties werden geen soorten gevonden die specifiek grondwater of een lage temperatuur indiceren. Enerzijds kan dit toe te schrijven zijn aan het lage aantal soorten dat in het gebied is gevonden (aantal taxa=62). Anderzijds wordt hiermee duidelijk dat lokaal andere factoren van grotere invloed zijn, zoals een laag zuurstofniveau in stagnante wateren, terwijl dit hier juist samenhangt met grondwateruittrekking. Het op een enkele locatie toepassen van metrics is dus niet voldoende informatief om een indruk te verkrijgen van mogelijke grondwatervoeding, laat staan de mate van grondwaterinvloed in een beekstelsel. Daarvoor is monitoring van macrofauna en toepassing van metrics op deze gemeenschap in een grootschaliger gebied nodig.

De toegevoegde waarde van het monitoren van op macrofauna gebaseerde metrics voor het indiceren van grondwaterinvloed ten opzichte van alleen het doen van temperatuurmetingen is dat een levensgemeenschap de variatie in milieuomstandigheden op een plek over een langere tijd integreert. Een habitat moet namelijk jaarrond geschikt zijn voor een organisme om er te kunnen overleven en gedijen. In het geval van grondwater indicerende organismen zijn dat bijvoorbeeld een jaarronde lage temperatuur en de afwezigheid van droogval. Ook al wordt de temperatuur jaarrond continu gemeten, dan nog zijn temperatuurmetingen gevoelig voor de invloed van andere omgevingsvariabelen, zoals beschaduwning. Ook vergen temperatuurmetingen met voldoende resolutie voor een uitspraak over grondwaterbuffering een grote inspanning (Kaandorp, 2019). Ook in het studiegebied was te zien dat de locaties onderling sterk verschillende temperatuursignalen geven, al was er wel een duidelijke demping te zien daar waar grondwater direct uittrad. Het bekijken van de macrofaunagemeenschap en het doen van een continue temperatuurmeting kan elkaar dus aanvullen en versterken.

3. Welke combinaties en vormen van op de macro-invertebratengemeenschap gebaseerde metrics kunnen worden gebruikt om grondwaterinvloed aan te tonen?

De toepassing van de geselecteerde metrics op een grotere dataset van al dan niet grondwatergevoede systemen in Nederland liet de onderscheidende werking zien van een aantal van de kandidaat-metrics. Dit waren de volgende: preferente stromingszone bron(loopje)/bovenloop, temperatuurpreferentie tot 10°C, focustemperatuur, aantal taxa met grondwaterindicatie, voorkomen in zeer ondiep/bronnmilieu en stromingspreferentie'. Echter, het is aan te bevelen om de toepasbaarheid van metrics verder te toetsen met een uitgebreidere dataset van Nederlandse oppervlaktewateren waarbij de mate van grondwatervoeding op een gelijkwaardige en reproduceerbare manier is geclassificeerd.

Effecten van grondwaterinvloed in beken in kaart brengen met behulp van metrics gebaseerd op beekorganismen met een indicatiewaarde

Met de bovenstaande resultaten kan worden geconcludeerd dat het inzichtelijk maken van de effecten van grondwaterinvloed in herstelde beken – met behulp van metrics gebaseerd op beekorganismen met een indicatiewaarde – mogelijk, maar nog niet praktisch toepasbaar is. Een uitbreiding van monitoring van grondwaterinvloed en preferentiedata van indicatorsoorten kan een toekomstige ontwikkeling wel verder ondersteunen.

Daarom wordt aanbevolen om het functioneren van het grondwatersysteem uitgebreider in monitoringsprogramma's op te nemen, zoals de ontwikkeling en grootte van grondwaterfluxen, grondwaterkwaliteit en kwellocaties. Zo kan de koppeling tussen ecologie en de heersende milieuomstandigheden worden gemaakt. Dit is ook van belang vanwege de 'vergrijzing' van het grondwater, oftewel de achteruitgang van de chemische kwaliteit, waardoor dit op de langere termijn een druk op de ecologische toestand kan gaan vormen.

Voor het in kaart brengen van effectiviteit van integraal herstel van beekdallandschappen zal naast een herstelde invloed van grondwatervoeding in beken ook naar andere hydrologische factoren moeten worden gekeken, zoals in het afvoerpatroon de vermindering van piekafvoeren, stabilisatie van de stroomsnelheid en een verbetering van de watervoerendheid. Daarnaast kunnen ecologische indicatoren het monitoren van herstel ondersteunen.

Literatuur

- Aggenbach, C.J.S., Groenendijk, D., Kemmers, R.H., Van Kleef, H.H., Smolders, A.J.P., Verberk, W.C.E.P. & Verdonschot, P.F.M. (2009). Preadvies beekdallandschappen. Knelpunten, kennislacunes en kennisvragen voor natuurherstel in beekdalen. Rapport DK nr. 2009/dk107-O, Directie Kennis Ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij, Ede.
- AQEM CONSORTIUM (2002). Manual for the application of the AQEM system. A comprehensive method to assess European streams using benthic macroinvertebrates, developed for the purpose of the Water Framework Directive. Version 1.0, February 2002.
- Besse-Lototskaya, A., Verdonschot, R.C.M., Verdonschot, P.F.M. & Klostermann, J. (2007). Doorwerking klimaatverandering in KRW-keuzen: casus beken en beekdalen (literatuurstudie). Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1536.
- Bhowmik A.K., Schäfer R.B. (2015). Large Scale Relationship between Aquatic Insect Traits and Climate. PLoS ONE 10(6): e0130025.
- Bowler, D., Böhning-Gaese, K. (2017). Improving the community-temperature index as a climate change indicator. PLoS ONE 12(9): e0184275. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184275>.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. Freshwater Biology, 51: 1389-1406.
- Deskundigenteam Beekdallandschap OBN (2011). Brochure herstel van beekdalen.
- Devictor, V., van Swaay, C., Brereton, T. et al. (2012). Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. Nature Clim Change 2, 121-124. <https://doi.org/10.1038/nclimate1347>.
- Euro-limpacs consortium (2006). Freshwaterecology.info. The Taxa and Autecology Database for Freshwater Organisms. Available from www.freshwaterecology.info (version 3.1, 02/2007).
- Graf, W., J. Murphy, J. Dahl, C. Zamora-Muñoz, Lopez Rodriguez, M. J. and Schmidt-Kloiber, A. (2006). Trichoptera Indicator Database on www.freshwaterecology.info. Euro-limpacs project (contract no. GOCE-CT-2003 – 505540), Workpackage 7 – Indicators of ecosystem health, Task 4.
- Halle, M., Müller, A. & Sundermann, A. (2016). Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoo- benthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA- Berichte, Heft 20 (www.kliwa.de).
- Hering, D., Johnson, R. K., Kramm, S., Schmutz, S., Szoszkiewicz, K., & Verdonschot, P. F. (2006). Assessment of European streams with diatoms, macrophytes, macroinvertebrates and fish: a comparative metric-based analysis of organism response to stress. Freshwater biology, 51(9), 1757-1785.
- Hering, D., Schmidt-Kloiber, A., Murphy, J., Lücke, S., Zamora-Muñoz, C., López-Rodríguez, M.-J., Huber, T., Graf, W. (2009). Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. Aquatic Sciences 71: 3-14.
- Isaak, D.J., Young, M.K., Nagel, D.E., Horan, D.L. and Groce, M.C. (2015). The cold-water climate shield: delineating refugia for preserving salmonid fishes through the 21st century. Glob Change Biol, 21: 2540-2553.
- Kaandorp, V.P., Doornenbal, P.J., Kooi, H., Broers, H.P., de Louw, P.G.B. (2019). Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions. Journal of Hydrology 3: 100031.
- Kalkman, V.J. & Van der Velde, G. (2007). In: Kalkman, V.J. De soorten van het leefgebiedenbeleid. – EIS-Nederland, Leiden.
- Karr, J.R. & Chu, E.W. (1999). Restoring life in running waters: better biological monitoring. Island Press, Washington DC.
- Kemmers, R.H., Gieske, J.M.J., Veen, P., & Zonneveld, L. M. L. (1995). *Standaard meetprotocol verdroging; voorlopige richtlijnen voor monitoring van anti-verdrogingsprojecten*. Nationaal Onderzoeksprogramma Verdroging. <https://edepot.wur.nl/73228>.

- Klöve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z. & Erturk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J. & Karakaya, N., Kupfersberger, H., Kværner, J., Lundberg, A., Mileusnić, M., Moszczyńska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Simek, J., Wachniew, P., Widerlun, A. (2011). Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*. 14. 770-781. [10.1016/j.envsci.2011.04.002](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002).
- Lajeunesse, A., & Fourcade, Y. (2023). Temporal analysis of GBIF data reveals the restructuring of communities following climate change. *Journal of Animal Ecology*, 92, 391– 402. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13854>.
- Land, E., & Peters, C.N. (2023). Groundwater impacts on stream biodiversity and communities: a review. *Journal of Freshwater Ecology*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/02705060.2023.2260801>.
- Van der Lee, G.H., Kraak, M.H.S., Verdonschot, R.C.M., Verdonschot, P.F.M. (2020). Persist or perish: critical life stages determine the sensitivity of invertebrates to disturbances. *Aquatic Sciences: research Across Boundaries* 82:24.
- Van der Lee G.H., Verdonschot R.C.M. en Verdonschot P.F.M. (2021). Advies voor het monitoren van de ecologische waterkwaliteit. Notitie Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK), Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen. pp. 28.
- Leitner, P. & Lorenz, A. (2020). Additional ecological preferences and biological traits classification for freshwaterecology.info.
- Lorenz, A., Hering, D., Feld, C.K. et al. (2004). A new method for assessing the impact of hydromorphological degradation on the macroinvertebrate fauna of five German stream types. *Hydrobiologia* 516, 107–127. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000025261.79761.b3>.
- Macadam, C.R., England, J., Chadd, R. (2022). The vulnerability of British aquatic insects to climate change. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* (423) 3 (2022). doi: 10.1051/kmae/2022003.
- Marzin, A., Archambault, V., Belliard, J., Chauvin, C., Delmas, F., & Pont, D. (2012). Ecological assessment of running waters: do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures?. *Ecological indicators*, 23, 56-65.
- Moog, O. & A. Hartmann (Eds.) (2017). *Fauna Aquatica Austriaca 3 - A Comprehensive Species Inventory of Austrian Aquatic Organisms with Ecological Notes*. Federal Ministry for Agriculture and Forestry, Wasserwirtschaftskadaster Vienna: loose-leaf binder.
- Noble, R.A.A., Cowx, I.G., Goffaux, D. and Kestemont, P. (2007). Assessing the health of European rivers using functional ecological guilds of fish communities: standardising species classification and approaches to metric selection. *Fisheries Management and Ecology*, 14: 381-392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2007.00575.x>.
- Ofenböck, T., Moog, O., Gerritsen, J. et al. (2004). A stressor specific multimetric approach for monitoring running waters in Austria using benthic macro-invertebrates. *Hydrobiologia* **516**, 251–268 <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000025269.74061.f9>.
- Schaminée, J., Haveman, R., Hennekens, S., Horsthuis, M., Janssen, J., Ronde, I. de, Smits, N. en Sýkora, K. (2022). *Veldgids Plantengemeenschappen van Nederland*, KNNV Uitgeverij Veldgids nr 25, 3e druk, pp. 129.
- Schmidt-Kloiber, A. & D. Hering (Eds.) (2009). *Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms*. Pensoft Publishers (Sofia-Moscow). 262pp. Volume 1 – Trichoptera (Graf, W., Murphy, J., Dahl, J., Zamora-Munoz, C. & Lopez-Rodriguez, M.J.), Volume 2 – Plecoptera. (Graf, W., Lorenz, A.W., Tierno de Figueroa, J.M., Lücke, S., Lopez-Rodriguez, M.J. & Davies, C.), Volume 3 – Ephemeroptera (Buffagni, A., Cazzola, M., Lopez-Rodriguez, M.J., Alba-Tercedor, J. & Armanini, D.G.)
- Schmidt-Kloiber, A. & Hering D. (2015). www.freshwaterecology.info - an online tool that unifies, standardises and codifies more than 20,000 European freshwater organisms and their ecological preferences. *Ecological Indicators* 53: 271-282. doi: [10.1016/j.ecolind.2015.02.007](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.007).
- Sparrius, L.B., G.G. van den Top & C.A.M. van Swaay. (2018). An approach to calculate a Species Temperature Index for flora based on open data. *Gorteria Dutch Botanical Archives*, 40(1), 73–78.
- Springer, A. E. & L. E. Stevens, 2008. Spheres of discharge of springs. *Hydrogeology Journal* 17: 83–93.
- Straka M., Polášek, M., Syrovátka, V., Stubbington, R., Zahrádková, S., Němejcová, D., Šikulová, L., Řezníčková, P., Opatřilová, L., Datry, T. & Pařil, P. (2019). Recognition of stream drying based on benthic macroinvertebrates: A new tool in Central Europe. *Ecological Indicators* 106 (2019) 105486.
- Tachet, H., Bournaud, M., Richoux, P. & Usseglio-Polatera, P. (2010). *Invertébrés d'eau douce - systématique, biologie, écologie*. CNRS Editions, Paris, 600 p.

-
- Tierno de Figueroa, J.M., López-Rodríguez, M.J., Lorenz, A. et al. (2010). Vulnerable taxa of European Plecoptera (Insecta) in the context of climate change. *Biodivers Conserv* 19, 1269–1277
<https://doi.org/10.1007/s10531-009-9753-9>.
- Van der Hoek W.F. & Verdonshot P.F.M. (1994). Functionele karakterisering van aquatische ecotootypen. IBN rapport 072: 1-81.
- Van der Molen et al. (2024). Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2021-2027, versie mei 2024. Stowa Rapport 2018-49.
- Van Wirdum, G. (1990). Vegetation and hydrology of floating rich-fens.
- Verdonshot, P.F.M. (1990). Ecological characterization of surface waters in the province of Overijssel (The Netherlands). Thesis, Wageningen, 1 255.
- Verdonshot P.F.M., Runhaar H., Van der Hoek W.F., De Bok C.F.M. & Specken B.P.M. (1992). Een aanzet tot een ecologische indeling van oppervlaktewateren in Nederland. IBN/RIN rapport 92, CML rep. 78: 1-100.
- Verdonshot, P.F.M. (2000). Natuurlijke levensgemeenschappen van de Nederlandse binnenwateren. Deel 1, bronnen. Achtergronddocument bij het 'Handboek Natuurdoeltypen in Nederland'. 86 pp.
- Verdonshot, P.F.M. (2000). Natuurlijke levensgemeenschappen van de Nederlandse binnenwateren. Deel 2 – Beken. Achtergronddocument bij het 'Handboek Natuurdoeltypen in Nederland.' Rapport EC-LNV nr AS-02. Wageningen.
- Verdonshot, P.F.M., Runhaar, H., Hendriks, D., Verdonshot, R.C.M. (2017). Integraal natuurherstel in beekdalen - Ontwikkeling van diffuse afvoersystemen, gedempte afvoerdynamiek en beekprofielherstel. O+BN Rapport nr. 2017/215-BE.
- Verdonshot, P.F.M. & Verdonshot, R.C.M. (2021). Indicatiewaarden van aquatische organismen. Kennisdocument Kennisimpuls waterkwaliteit (KIWK), Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen UR, Wageningen. 46 pp.
- Verhagen, F., Spek, T., Witte, F., Voortman, B., Moors, Eddy., Querner, E., van den Eertwegh, G. van Bake, J. (2014). Begrijpen we het watersysteem? Expertdialoog de Veluwe. Stromingen 20.
- De Vries, J., Verdonshot, R.C.M. (2023). Van de regen in de drup; Verkenning van de huidige kennis en praktijk rond integraal herstel van beekdallandschappen. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- Wagenhoff A., Shearer K., Clapcott J. (2016). A review of benthic macroinvertebrate metrics for assessing stream ecosystem health. Prepared for Environment Southland. Cawthron Report No. 2852. 49p. plus appendices.
- Working group Aquatic Ecology (University Duisburg-Essen) (2016). Classifications for groundwater influence (expert judgement).
- Zografou, K., Kati, V., Grill, A., Wilson, R.J., Tzirkalli, E., et al. (2014). Signals of Climate Change in Butterfly Communities in a Mediterranean Protected Area. *PLoS ONE* 9(1): e87245.
doi: 10.1371/journal.pone.0087245.

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 3413
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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 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 3413
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, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 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.
