

stowa

EFFECTEN VAN IJZERRIJK KWELWATER OP DE MACROFAUNA



RAPPORT

2025
07

EFFECTEN VAN IJZERRIJK KWELWATER OP DE MACROFAUNA

RAPPORT

2025

07

ISBN 978.94.6479.088.7



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Jaap Postma (Ecofide)
Rineke Keijzers (Ecofide)

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Harry Bouwhuis (Waterschap Zuiderzeeland)
Luuk van Gerven (Waterschap Aa en Maas)
Ronald Gylstra (Waterschap Rivierenland)
Hermen Klomp (Waterschap Hunze en Aa's)
Veerle Plakman (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
Amber Schaafstra (Waterschap De Dommel)
Eelke Schoppers (Waterschap Hunze en Aa's)
Henk Tamerus (Waterschap De Dommel)
Anne Vonk (Waterschap Zuiderzeeland)
Tessa van der Wijngaart (STOWA)

FOTOGRAFEN

Annemiek Keijzers
Anne Vonk
Ronald Gylstra
Peter Paul Schollema

VORMGEVING Buro Vormvast
STOWA STOWA 2025-07
ISBN 978.94.6479.088.7

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

VERANDERINGEN IN DE MACROFAUNAGEMEENSCHAP DOOR IJZERRIJKE KWEL VERDIENEN AANDACHT

IJzerrijke kwel is een natuurlijk en vaak gewenst proces, dat tot specifieke milieuechemische condities en een hierop aangepaste levensgemeenschap leidt. Met de nu voorgestelde grenswaarden krijgen waterbeheerders een beter inzicht in zowel de grootte van deze ecologische veranderingen als de ruimtelijke omvang hiervan. Dit maakt het voor waterbeheerders mogelijk om na te gaan of deze veranderingen op een passende manier in de KRW-beoordeling en doelaflleiding zijn meegewogen.

Zelfs met een visuele inspectie van een typische 'rode beek' kunnen veranderingen in de macrofaunagemeenschap eenvoudig worden vastgesteld. De huidige pilotstudie richt zich dan ook niet op de vraag of ijzerrijke kwel tot veranderingen in de macrofaunagemeenschap leidt, maar op de vraag vanaf welke concentraties deze veranderingen optreden en in welke mate deze veranderingen gevolgen hebben voor de KRW-beoordeling en haalbaarheid van doelen. Zo vormt dit van nature voorkomende proces geen expliciet onderdeel van het KRW-beoordelingssysteem noch van de kwantitatieve rekenregels over het effect van maatregelen. Dit leidt tot zorgen over de haalbaarheid van doelen, aangezien deze doelen veelal zijn vastgesteld op basis van de huidige toestand plus het verwachte effect van mogelijke maatregelen.

Op basis van zes case studies bij evenzoveel waterbeheerders zijn zowel de kwalitatieve als kwantitatieve veranderingen in de macrofaunagemeenschap gekenmerkt. Zowel een tekort aan totaal ijzeranalyses als een klein aantal monsters met hoge totaal ijzerconcentraties leidde tot beperkingen in vooral deze kwantitatieve aspecten. De desondanks ingeschatte grenswaarden kwamen op ordegrootte echter redelijk overeen met vergelijkbare waarden uit de internationale literatuur. Gezamenlijk leidde dit tot de conclusie dat er vanaf totaal ijzerconcentraties tussen de 0,5 – 1,5 mg/l sprake is van een beginnend effect op de macrofauna. Denk hierbij aan een 20% afname in de dichtheid van gevoelige soorten. Bij concentraties boven de circa 1,5 – 4 mg/l is de dichtheid van gevoelige soorten gehalveerd en kan het kwaliteitsoordeel een klasse lager zijn.

De in de case studies aanwezige totaal ijzeranalyses laten zien dat deze grenswaarden in een aanzienlijk deel van de watergangen overschreden kunnen worden. Waterbeheerders wordt dan ook aangeraden om bij de lopende monitoring van de macrofauna ook de totaal ijzerconcentraties consequent mee te nemen. Daarnaast wordt geadviseerd om een proces van gedachtenvorming op te starten rondom het (in specifieke situaties) eventueel aanpassen van de ecologische doelen en/of het ontwikkelen van een meer specifieke maatlat voor deze met ijzer belaste watersystemen. Daarmee zouden deze typische en vaak soortenarmere levensgemeenschappen een hogere EKR-waarde kunnen krijgen, die recht doet aan het achterliggende, natuurlijke proces.

Mark van der Werf
Directeur STOWA

SAMENVATTING

IJzerrijk kwelwater is voor veel wateren een natuurlijk proces, dat tot specifieke milieuchemische condities leidt en daarmee ook tot een eigen levensgemeenschap van hierop aangepaste soorten. In de Nederlandse literatuur zijn hier verschillende voorbeelden van te vinden, zoals de ‘rode beken’ bij Waterschap Rijn en IJssel, die zich lieten karakteriseren door de vrijwel volledige afwezigheid van typische stromend water soorten (Nijboer en Boedeltje, 2011). Dit (ook binnen het voorliggende rapport) gebruik van terminologie als ‘afwezigheid van typische stromend water soorten’, ‘effecten van ijzer’ of ‘gevoelige soorten’ zou echter eenvoudig tot een onjuiste beeldvorming kunnen leiden. Alsof ijzerrijke kwel een negatief en ongewenst effect is, dat door aangepast waterkwaliteitsbeheer zo goed mogelijk voorkómen moet worden. Het tegenovergestelde is waar. Dit natuurlijke proces met specifieke milieuchemische condities en een daarop aangepaste levensgemeenschap wordt bij veel waterbeheerders niet alleen gewaardeerd maar waar mogelijk ook versterkt. De huidige pilotstudie richt zich dan ook niet op de vraag óf ijzerrijke kwel tot veranderingen in de macrofaunagemeenschap leidt (een visuele inspectie van de watergang is hiervoor vaak al genoeg), maar op een achterliggende vraag rondom de beoordeling en haalbaarheid van doelen. Zo vormt deze reeds lang bekende verandering in de macrofaunagemeenschap geen expliciet onderdeel van het binnen Nederland ontwikkelde KRW-beoordelingssysteem en de daarbij behorende maatlaten. Dit hoeft geen probleem te zijn, zolang deze veranderingen in de levensgemeenschap in grootte niet te omvangrijk en in ruimte niet alom aanwezig zijn.



De centrale vraag voor de voorliggende pilotstudie was dan ook nagaan hoe de situatie in Nederland zich tot deze randvoorwaarden verhoudt. De hiervoor uitgevoerde data-analyse richtte zich op zes case studies bij evenzoveel waterbeheerders¹, aangezien de situatie kan verschillen tussen bijvoorbeeld bovenlopen van beken, diepgelegen polders en duinwateren. Iedere waterbeheerder heeft een in omvang variërende set met fysisch/chemische en ecolo-

¹ Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en de waterschappen Zuiderzeeland, De Dommel, Hunze en Aa's, Rivierenland en Aa en Maas

gische monitoringsgegevens aangeleverd. In deze case studies is telkens gekeken naar de kwalitatieve en kwantitatieve relatie tussen de totaal ijzerconcentratie en de macrofaunagemeenschap. Deze leidende rol van de totaal ijzerconcentratie wordt ondersteund vanuit de meer fysieke effecten door uitvlokkend ijzer (bedekking van voedselbronnen, verstikking bij kieuwen etc.). De eventuele veranderingen in de macrofaunagemeenschap zijn echter niet noodzakelijkerwijs een direct effect van alleen deze totaal ijzerconcentratie. IJzerrijke kwel laat zich bijvoorbeeld ook herkennen aan veranderingen in de pH, zuurstofgehalten of de concentraties van nutriënten, mangaan, sulfaat en macro-ionen.

Vier waterbeheerders hebben een bewust geselecteerde, relatief kleine dataset aangeleverd, waarbij de kwalitatieve veranderingen in de macrofaunagemeenschap bij verhoogde totaal ijzerconcentraties redelijk tot goed met elkaar overeenkwamen. Zo lieten de multivariate analyses bij alle vier waterbeheerders zien, dat de locaties met de hoogste totaal ijzerconcentraties een duidelijk andere plaats in het diagram innamen dan de controlelocaties en eveneens dat locaties met een meer gemiddelde ijzerconcentratie ook een meer intermediaire positie innemen. De samenstelling van de macrofaunagemeenschap verandert kennelijk op een manier, die met de totaal ijzerconcentraties correleert. Naast deze ordening van de macrofaunagemeenschap als geheel gaven de multivariate analyses ook inzicht in de meest onderscheidende soorten. Hieruit bleek dat soorten, die bij hogere totaal ijzerconcentraties niet of in een veel lagere dichtheid voorkwamen, vaak tot de vlokreeften, watermijten, haften, libellen of kokerjuffers behoorden. Bij totaal ijzerconcentraties boven de 4 mg/l bleek de gesommeerde dichtheid van deze vijf soortgroepen telkens meer dan de helft lager te liggen dan in de controlelocaties. Tegelijkertijd bleken de dichtheden van oligochaete wormen juist toe te nemen. Deze veranderingen in de macrofaunagemeenschap waren telkens terug te zien in dalende EKR-waarden, een afnemend aantal soorten en/of lagere dichtheden van de gevoelige soortgroepen.

Wel moet worden opgemerkt dat de omvang van deze veranderingen niet overal even sterk was. Dit kwam deels door situaties, waar andere stuurfactoren juist een positief effect op de levensgemeenschap hadden, zoals de aanwezigheid van een natuurvriendelijke oever of een hogere stroomsnelheid. Ook de beschikbare meetgegevens als zodanig leidden tot verschillende aandachtspunten. De twee belangrijkste waren een beperkt aantal situaties, waarbij de macrofauna en totaal ijzerconcentraties van dezelfde locatie en jaar afkomstig zijn en een beperkt aantal macrofauna monsters afkomstig van situaties met een relatief hoge totaal ijzerconcentratie. Deze aandachtspunten betroffen niet alleen de vier kleinere datasets, maar ook de twee beduidend grotere datasets van de waterschappen Aa en Maas en Rivierenland. Mede hierdoor waren de conclusies voor deze twee grotere datasets ambivalent en kon er voor beide datasets geen eenduidig verband worden aangetoond tussen toenemende totaal ijzerconcentraties en veranderingen in de macrofaunagemeenschappen.

Om de invloed van deze aandachtspunten bij de data-analyse te beperken zijn de meer kwantitatieve vragen beantwoord middels het uitvoeren van kwantielregressies op de gecombineerde dataset en zijn deze eveneens vergeleken met vergelijkbare analyses in de internationale literatuur. Dit leidde tot de volgende conclusies:

- De bovengrens voor kleine of onbeduidende effecten ligt rond een totaal ijzerconcentratie van 0,5 – 1,5 mg/l en is gebaseerd op een afname van 20% in de dichtheid van gevoelige soorten. Vanuit de huidige studie werd hiervoor een grenswaarde van 1,3 mg/l berekend en vanuit drie vergelijkbare studies in de literatuur varieerde de grenswaarden voor dit beschermingsniveau tussen de 0,21 en 0,77 mg/l (Cadmus et al., 2018; Linton et

al., 2007; Peters et al., 2012).

- Voor kleine tot matige effecten op de macrofauna varieert de ondergrens tussen de 1,5 en 4 mg/l aan totaal ijzer. De grenswaarde van 4 mg/l is het resultaat van de huidige studie en is gebaseerd op twee effecten, namelijk een halvering van de dichtheid van gevoelige soortgroepen en een afname van de EKR-waarde met 20%. Vanuit de literatuur wordt gekomen tot een grenswaarde van 1,7 mg/l (op basis van een halvering van de dichtheid van een gemiddeld gevoelige soortgroep) en 1,8 mg/l (op basis van de overgang van een goede naar een matige ecologische kwaliteit). In situaties met een lage hardheid en DOC concentratie zouden deze grenswaarden (vanwege de hogere gevoeligheid) wellicht nog verlaagd moeten worden.

Dat bovengenoemde grenswaarden vanuit de huidige studie iets hoger liggen dan de waarden uit de literatuur heeft mogelijk te maken met de eerder genoemde aandachtspunten in de omvang en kwaliteit van de beschikbare meetgegevens, waardoor ze als meer indicatieve waarden gezien moeten worden. Gezamenlijk met de gegevens uit de literatuur leiden de huidige resultaten evengoed tot het advies aan waterbeheerders om allereerst na te gaan hoe de totaal ijzerconcentraties in hun beheergebied zich verhouden tot bovenstaande grenswaarden. Hoe groter het aandeel watergangen (cq. waterlichamen), die deze grenswaarden overschrijden, hoe relevanter het voor de waterbeheerder wordt om een vervolgstap te zetten en bij de lopende monitoring van de macrofauna ook de totaal ijzerconcentraties consequent mee te nemen. Op die manier wordt begonnen met het verbreden en verbeteren van de dataset. In de toekomst kunnen de effecten van de totaal ijzerconcentraties hierdoor betrouwbaarder gekwantificeerd worden. De tot nu toe in de datasets aangetroffen totaal ijzerconcentraties onderschrijven de relevantie van dit advies. Zo varieert de 25-percentielwaarde van de jaargemiddelde totaal ijzerconcentraties binnen de zes bestudeerde datasets tussen de 0,7 en 2,4 mg/l. Dat betekent dat zeker de bovengrens van 0,5 – 1,5 mg/l ter voorkoming van kleine tot matige effecten in veel wateren overschreden wordt. De bevindingen leiden daarmee eveneens tot het advies om een proces van gedachtenvorming op te starten rondom het (in specifieke situaties) eventueel aanpassen van de ecologische doelen en/of het ontwikkelen van een meer specifieke maatlat voor deze met ijzer belaste watersystemen. Daarmee zouden deze typische en vaak soortenarmere levensgemeenschappen juist een hogere EKR-waarde kunnen krijgen naarmate ze de natuurlijke situatie meer benaderen.

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

EFFECTEN VAN IJZERRIJK KWELWATER OP DE MACROFAUNA

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Aanleiding	1
	1.2 Doelstelling en opzet van het project	2
2	CASE STUDIES	4
	2.1 Keuzes en aandachtspunten rondom de uitgevoerde data-analyses	5
	2.2 Waterschap Zuiderzeeland	9
	2.3 Waterschap De Dommel	17
	2.4 Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	26
	2.5 Waterschap Hunze en Aa's	31
	2.6 Waterschap Aa en Maas	40
	2.7 Waterschap Rivierenland	43
3	DISCUSSIE	46
4	REFERENTIES	57

1

INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Kwelwater vormt voor veel stromende wateren het fundament onder het aquatische ecosysteem. Het is een veelal natuurlijk proces, dat tot specifieke milieuchemische condities leidt en daarmee ook tot een eigen levensgemeenschap van hierop aangepaste soorten. Afhankelijk van de geologie kan ijzerrijke en ijzerarme kwel op korte afstand van elkaar voorkomen, zoals te zien in de Rode Beek en Nieuwe Beek in Vaassen waar vroeger een houten schot is aangebracht om de wasserijen van helder water te voorzien. Beide typen kwel zijn een van nature voorkomende situatie, maar bij ijzerrijke kwel kan oxiderend ijzer een aanvullende en soms bepalende invloed op de aquatische levensgemeenschap hebben.



Dit effect van het uitvlokken van ijzer(hydr)oxides op de macrofauna van bronbeken werd in 1966 al beschreven door Thorup (geciteerd door Hynes, 1970). Ook in Nederland zijn er meerdere studies, waarin de effecten van verhoogde ijzerconcentraties op de macrofauna worden beschreven. Bij een typering van beek-bovenlopen (Franken, 1996) werd de aanwezigheid van ijzer bijvoorbeeld als een 'type onderscheidend kenmerk' benoemd (namelijk de zure, ijzerrijke, droogvallende bovenlopen). Ook in een evaluatie van 23 jaar aan macrofauna gegevens (Nijboer en Boedeltje, 2011) werden de 'rode beken' als een aparte groep binnen de natuurlijke stromende beken beschreven. Typische stromend water soorten kwamen in deze rode beken nauwelijks voor en ook de meer algemeen voorkomende vlokreeften werden nog maar in enkele monsters aangetroffen. Ook Klink (2012) gaat in op de effecten van verhoogde ijzerconcentraties en constateert vanuit de literatuur, dat vooral eendagsvliegen, steenvliegen en kokerjuffers tot de gevoelige groepen behoren.

Dit (ook binnen het voorliggende rapport) gebruik van terminologie als 'afname van de macrofauna', 'afwezigheid van typische stromend water soorten', 'effect van ijzer' of 'gevoelige soorten' zou echter eenvoudig tot een onjuiste interpretatie kunnen leiden. Alsof dit een negatief effect is, dat door aangepast waterkwaliteitsbeheer zo goed mogelijk voorkómen

moet worden. Het tegenovergestelde is waar. Naast het feit dat dit een natuurlijk proces is, leidt ijzerrijk kwelwater niet alleen tot verhoogde ijzerconcentraties maar ook tot veranderingen in bijvoorbeeld de pH, zuurstofgehaltes alsmede in de concentraties van nutriënten, mangaan, sulfaat en allerlei macro-ionen. Dit leidt tot specifieke milieumcondities en een daarop aangepaste levensgemeenschap², die in het waterbeheer niet alleen wordt gewaardeerd maar waar mogelijk ook wordt versterkt.

Het voorkomen van ijzerrijk kwelwater is niet tot beken beperkt. In aanwezigheid van hoogtevverschillen komt (al dan niet ijzerrijk) kwelwater ook in de lagere delen van Nederland voor. Zo komt er vanuit de Utrechtse Heuvelrug veel kwelwater naar de omgeving van de Vechtplassen en gebeurt hetzelfde met kwelwater uit de Veluwe in de Flevopolders. Zo werd in zowel de veldsituatie als een kleinschalig laboratorium experiment geconstateerd, dat Quaggamosselen uit het IJsselmeer binnen een week of twee kwamen te overlijden als ze in ijzerrijk oppervlaktewater uit de Noordoostpolder werden gehouden (Ecofide, niet gepubliceerd). Ook minder diepe waterstromen kunnen tot kwelsituaties leiden, zoals vaak te zien in het rivierenlandschap (achter dijken opkwellend water), maar ook het drainagewater van percelen kan (deels) bestaan uit opkwellend (ijzerrijk) grondwater.

INTERMEZZO DIRECTE EN INDIRECTE EFFECTEN VAN VERHOOGDE IJZERCONCENTRATIES

Ecologische effecten van verhoogde ijzerconcentraties zijn vaak een samenspel van directe ecotoxicologische en indirecte fysische (bijv. verstikking bij precipitatie op kieuwen, belemmering van emergentie of verandering van habitat, foerageergedrag en voedselkwaliteit; Brix et al., 2023; Gerhardt & Westermann, 1995; Gerhardt, 1992; Kinsman-Costello et al., 2015; Kotalik et al., 2019; Vuori, 1995) of chemische (bijv. binding en co-precipitatie van andere metalen of fosfor; Brix et al., 2023; KWR, 2022) effecten. Hierdoor correleren de ecologische effecten veelal beter met de totaal dan met opgeloste ijzerconcentraties en zijn de indirecte effecten veelal groter dan de directe toxiciteit van opgelost ijzer (Linton et al., 2007; Reich et al., 2019). Verder varieert de sterkte van deze ecotoxicologische effecten in afhankelijkheid van pH, hardheid en DOC (Brix et al., 2023; Cardwell, 2023; Gerhardt, 1994), waarbij de toxiciteit bij lagere pH, hardheid en DOC veelal hoger is (Peters et al., 2012).

1.2 DOELSTELLING EN OPZET VAN HET PROJECT

Vanwege deze vanouds al bekende veranderingen in de macrofaunagemeenschap bij ijzerbelaste watersystemen, richtte de huidige pilotstudie zich niet op de vraag óf ijzerrijke kwel tot veranderingen in de macrofaunagemeenschap leidt, maar meer op de vraag vanaf welke concentraties deze veranderingen optreden³ en in welke mate deze veranderingen gevolgen hebben voor de (KRW) beoordeling en haalbaarheid van doelen. Zo zijn er in landelijke data-analyses (uitgevoerd ter onderbouwing van de op te stellen KRW-watertypen) geen aanwijzingen gevonden, die een apart (sub)watertype voor de met ijzerbelaste watersystemen rechtvaardigde (mond. mededeling dhr. PFM Verdonchot). Dit kan allerlei oorzaken hebben, waaronder een beperkte dataset voor totaal ijzerconcentraties en de op voorhand opgelegde keuze om het aantal KRW-watertypen beperkt te houden. Dit betekent eveneens dat op een meer lokale of regionale schaal zich situaties kunnen voordoen, waarbij lage EKR-waarden deels of zelfs voornamelijk door ijzerrijke kwel zijn veroorzaakt, terwijl deze als natuurlijk te karakteriseren verandering van de levensgemeenschap noch in de ecologische doelstelling noch in het verwachte effect van maatregelen is meegewogen.

2 Dit betreft niet alleen de macrofauna. In kwelrijke situaties kunnen zich ook interessante plantengemeenschappen ontwikkelen.

3 In Nederland is voor ijzer alleen een indicatieve MTR-waarde beschikbaar voor de opgeloste ijzerconcentraties. Deze stamt uit 2015 en bedraagt 96 µg/l.

Waterbeheerders hebben dan ook behoefte aan antwoorden op de vraag of de omvang van deze veranderingen in de levensgemeenschappen zodanig groot is, dat ze meer aandacht aan dit fenomeen moeten besteden en zich bijvoorbeeld moeten afvragen of de huidige beoordelingsmethodiek en doelafleiding hier in voldoende mate rekening mee houdt. In feite vraagt dit om een stapsgewijs proces. De voorliggende pilotstudie vormt hierbij een eerste stap door inzicht te geven in de aard en omvang van de effecten van ijzerrijke kwel. Hiermee wordt het voor waterbeheerders mogelijk om ook een tweede stap te zetten en inzicht te krijgen in de ruimtelijke omvang van deze effecten binnen hun beheergebied en besluiten te nemen over de wenselijkheid van een eventueel vervolg.

Voor de huidige pilotstudie hebben zes waterbeheerders (HHNK, WSRL, WSHA, WSDD, WSAM en WSZZ) een in omvang variërende set met fysisch/chemische en ecologische meetgegevens aangeleverd. In deze case studies is telkens gekeken naar de relatie tussen de totaal ijzerconcentratie en de macrofaunagemeenschap. De totaal ijzerconcentratie geeft inzicht in de omvang en effecten van ijzerrijke kwel, maar eventuele veranderingen in de macrofaunagemeenschap zijn niet noodzakelijkerwijs een direct effect van alleen deze ijzerconcentratie. Ijzerrijke kwel laat zich bijvoorbeeld ook herkennen aan verhoogde mangaan, calcium en bicarbonaat concentraties, waarbij ook het oxiderende mangaan tot neerslagen en effecten op de macrofauna kan leiden (Wilson et al., 2019). Daarnaast is de ijzerkringloop nauw verbonden met de stikstof-, fosfor- en zwavelkringloop⁴.

4 Zo vergroten ijzer(hydr)oxiden de capaciteit van de bodem om fosfaat vast te leggen en kunnen de fosfaat concentraties in het oppervlaktewater hierdoor wijzigen.

2

CASE STUDIES

Het doel van de case studies is nagaan of (en zo ja in welke mate) de aanwezigheid van ijzerrijke kwel tot veranderingen in de macrofaunagemeenschap kan leiden. Iedere case studie heeft hierbij zijn eigen karakteristieken, waardoor de zes case studies gezamenlijk inzicht in allerlei bronnen van variatie geven. Zo zijn er verschillen in de range aan ijzerconcentraties, zijn zowel stilstaande als stromende wateren bestudeerd en zijn er verschillen in de aanwezigheid van andere factoren, zoals chloride, stroomsnelheid, breedte en inrichting (natuurvriendelijke oevers).



Voor alle zes case studies is gekozen om telkens de jaargemiddelde totaal ijzerconcentratie als indicator voor ijzerrijke kwel te hanteren (Cardwell et al, 2023; Peters et al., 2011). De kweldruk, en daarmee ook de opgeloste ijzerconcentraties, kunnen tenslotte sterk tussen seizoenen variëren, terwijl eenmaal uitgevlokt ijzer voor een langere periode zichtbaar kan blijven. Een eventueel verband tussen deze totaal ijzerconcentratie en de macrofaunagemeenschap wil echter niet zeggen dat zo'n verandering ook causaal en uitsluitend door dit ijzer is veroorzaakt en ook de manier waarop effecten tot stand komen kan tussen situaties verschillen. Zo kan zowel opgelost als gebonden ijzer in wisselende mate door organismen worden opgenomen en in weefsels tot toxische effecten leiden. Als in het oppervlaktewater binnenkomend anoxisch ijzer oxideert en neerslaat zijn er echter ook allerlei indirecte effecten mogelijk, zoals het fysiek verstoren van ademhalingsprocessen, het bedekken van voedselbronnen of het verminderen van doorzicht, waardoor de groei van submerse waterplanten kan worden geremd. Daarnaast leidt ijzerrijke kwel niet alleen tot een toename van ijzer, maar zijn er ook vaak (in sterkte wisselende) correlaties tussen de ijzerconcentraties en andere parameters als sulfaat, ammonium, pH, zuurstofgehaltes of andere metalen als mangaan, barium en nikkel. Dit complexe geheel van optredende

processen en (in)directe effecten vergt een studie op zich en is in het voorliggend rapport niet uitgebreid besproken.

2.1 KEUZES EN AANDACHTSPUNTEN RONDOM DE UITGEVOERDE DATA-ANALYSES

Naast deze variatie in meer inhoudelijke factoren, heeft iedere case studie ook zijn eigen sterktes en zwaktes rondom de beschikbare meetgegevens. Idealiter zouden de datasets bestaan uit een vergelijkbare verzameling van fysische (bijv. pH, zuurstof, doorzicht, zwevend stof en stroming), chemische (naast ijzer ook bijv. hardheid, calcium, kalium, natrium, magnesium, chloride, geleidbaarheid en sulfaat) en ecologische parameters (bijv. vegetatie-opnames), aangevuld met locatiekenmerken als diepte, breedte en oevertype, die ook nog eens allemaal op dezelfde locaties in hetzelfde jaar en met vergelijkbare meetfrequenties zijn gemonitord. De case studies voor de waterschappen Zuiderzeeland, De Dommel en het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier voldeden redelijk aan deze ideale situatie. Belangrijkste aandachtspunten zijn hier het relatief beperkte aantal locaties (10-20) en voor Waterschap De Dommel ook een relatief kleine range aan totaal ijzerconcentraties en vooral weinig locaties met hoge ijzerconcentraties. Voor de drie overige case studies spelen andere aandachtspunten een grotere rol. De drie belangrijkste waren:

1. een verschil tussen de locaties waar de fysisch-chemische parameters zijn gemonitord en die waar de macrofauna is onderzocht;
In die gevallen heeft het waterschap aangegeven welke locaties aan elkaar gekoppeld konden worden. Soms werden er meerdere macrofauna locaties aan één fysisch-chemische meetlocatie gekoppeld. Daarnaast zijn niet op alle fysisch-chemische meetlocaties ook de ijzerconcentraties vastgesteld (ijzer is binnen de KRW niet een gevraagde standaardparameter) en waar dat wel het geval is zijn vanaf 2015 geregeld alleen de opgeloste ijzerconcentraties bepaald (vanaf circa 2015 zijn de meeste waterbeheerders overgegaan van de totaal concentraties van metalen naar de binnen de KRW gevraagde opgeloste metaal concentraties).
2. een verschil in de gemonitorde jaren;
Als de monitoringsjaren niet overeenkwamen werden de fysisch-chemische parameters waar mogelijk gebaseerd op het gemiddelde van het dichtst bij de macrofauna gelegen eerdere en latere monitoringsjaar (mits ≤ 2 jaar verschil). In andere gevallen werd het locatiegemiddelde gebruikt en
3. een verschil in het aantal ijzeranalyses;
Bij sommige locaties was er sprake van een grote temporele variatie (zowel binnen als tussen jaren). In die gevallen zijn er geen koppelingen gemaakt met macrofauna gegevens uit andere jaren. In andere gevallen waren er per jaar slechts een beperkt aantal monsters op ijzer geanalyseerd. Situaties met < 3 geanalyseerde monsters zijn niet gebruikt, tenzij uit de beschikbare data bleek dat de variatie binnen en tussen jaren beperkt was. In die gevallen werd een locatiegemiddelde gebruikt. In weer andere situaties waren alleen opgeloste ijzerconcentraties beschikbaar, terwijl er een voorkeur voor totaal ijzerconcentraties bestond. Deze opgeloste concentraties zijn niet gebruikt, tenzij de opgeloste concentraties al zo hoog waren dat de totaal ijzerconcentratie met zekerheid tot de hoogst aangetroffen concentraties behoorden en er een redelijke correlatie bleek te bestaan tussen de opgeloste en totaal ijzerconcentraties.

Uitgangspunt bij al deze keuzes was het streven naar een zo goed mogelijke balans tussen kwantiteit en kwaliteit. Een locatie waarvoor de totaal ijzerconcentratie in slechts één jaar is gemonitord is bijvoorbeeld aan maximaal drie macrofauna-monsters gekoppeld. Voor statistische analyses levert deze keuze beperkingen door het optreden van pseudoreplicatie⁵ (de drie macrofauna monsters van dezelfde locatie zijn statistisch niet onafhankelijk van elkaar). Aan de andere kant geeft de aanwezigheid van meerdere macrofauna-analyses van eenzelfde locatie wel aanvullend inzicht in de aanwezige variatie (is de variatie binnen een locatie kleiner dan tussen locaties). Pseudoreplicatie kan men in principe voorkómen door de analyses met locatiegemiddelde waarden uit te voeren. Voor de huidige data-analyse met EKR-waarden levert dit echter weer een ander aandachtspunt op. Zo geeft een standaard macrofauna monster (zoals een handnetmonster van 5 meter) eigenlijk nooit een compleet overzicht van alle aanwezige macrofauna soorten. Zeker voor de minder algemene soorten zal blijken dat men met een tweede monster op dezelfde tijd en plek toch weer enkele aanvullende soorten aantreft. In de huidige KRW-beoordeling speelt deze trefkans eigenlijk geen rol, aangezien het beoordelingssysteem ook op deze standaard monsternamen is gebaseerd. Dit wordt anders zodra men meerdere macrofauna monsters van eenzelfde locatie gaat middelen (of optellen). Dan wordt de soortenlijst namelijk langer en moet men zich afvragen welke gevolgen dit kan hebben voor bijvoorbeeld de deelmaatlat, die op de soortsaanwezigheid is gebaseerd. Als men bijvoorbeeld aanneemt dat de dichtheid (en dus trefkans) van kenmerkende soorten veelal lager zal zijn dan die van veel andere soorten, zal de deelmaatlat op basis van het aantal kenmerkende taxa (KM%) veelal stijgen bij het werken met een locatiegemiddeld macrofaunamonster. Daarmee levert een oplossing voor het ene aandachtspunt in een suboptimale dataset weer een ander aandachtspunt op en zullen dergelijke analyses altijd beperkingen kennen. Tegelijkertijd is de voorliggende studie opgestart als een pilot om inzicht te krijgen in de aard en omvang van eventuele effecten op de macrofauna en moet de studie vooral bijdragen aan de keuze van waterbeheerders of dit effect van ijzerrijke kwel voldoende groot is om verder onderzoek (inclusief meer specifieke en gekoppelde monsternamen) uit te willen voeren. Dit betekent dat bij de keuze van de data-analyses zoveel mogelijk rekening is gehouden met de verschillende aandachtspunten, maar tegelijkertijd ook dat deze aandachtspunten nu eenmaal onlosmakelijk aan de huidige pilotstudie zijn verbonden. Dit maakt eveneens dat de aanpak verschilt tussen de meer kwalitatieve beschrijving van drempelwaarden én de meer kwantitatieve beoordeling van de effectpercentages.

Voor de kwalitatieve beoordeling van drempelwaarden is eerst gekeken naar de vier in omvang beperkte datasets (§2.2-2.5; Waterschappen Zuiderzeeland, De Dommel, Hunze & Aa's alsmede het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier). Hierbij zijn de gegevens zowel univariaat als multivariaat bestudeerd. Bij het samenstellen van deze vier datasets heeft het betreffende waterschap de locaties bewust geselecteerd met als doel om de eventuele effecten van totaal ijzer zo goed mogelijk in beeld te krijgen. Hierdoor is het aantal locaties beperkt (8-20), is waar mogelijk ook de variatie door andere factoren beperkt en is er veelal een redelijke tot goede koppeling tussen het macrofauna-monster en de totaal ijzerconcentratie. Dit levert een duidelijker karakterisering van de effecten en bij de multivariate analyse ook een eenduidiger identificatie van gevoelige soortgroepen. Desondanks bleek bij alle vier deze case studies dat naast de totaal ijzerconcentratie ook andere variabelen een belangrijk effect op de macrofaunagemeenschap kunnen hebben (aanwezigheid van een natuurvriendelijke oever, breedte van de watergang [en de daar mogelijk aan gekoppelde stuurfactoren als het habitatdiversiteit], chloride en stroming). Vanwege de beperkte omvang

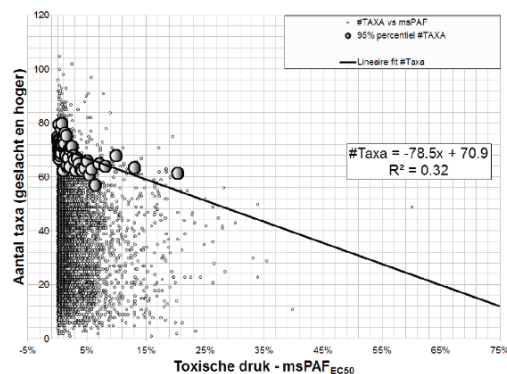
⁵ Pseudoreplicatie ontstaat als metingen niet onafhankelijk van elkaar zijn, maar wel zo worden geïnterpreteerd. Het effect hiervan wordt kleiner naarmate de dataset (cq. het aantal gemonitorde locaties) groter wordt.

van de geselecteerde data kon het effect van deze factor meestal goed worden benoemd. Dit ligt anders bij de andere twee case studies. De waterschappen Aa en Maas en Rivierenland hebben beide omvangrijke datasets gestuurd (resp. 330 en 533 monsters afkomstig van 103 en 96 locaties), waardoor er niet alleen een variatie in de totaal ijzerconcentratie aanwezig was, maar ook in allerlei andere stuurfactoren als watertype, breedte, nutriënt-concentraties etc. (§2.6-2.7). Middels een multivariate analyse kunnen deze parameters worden geduid, maar voor de meer kwalitatieve beoordeling van drempelwaarden zijn deze datasets minder geschikt.

Naast deze drempelwaarden is ook gekeken naar de grootte van het effect, die in de vorm van effectpercentages zijn gekwantificeerd. Gezamenlijk maken beide het voor waterbeheerders mogelijk om in te schatten in welk deel van hun beheergebied (cq. waterlichamen) de effecten van ijzerrijke kwel een (al dan niet) bepalende invloed op de macrofauna hebben cq. in welke mate verder onderzoek of acties wenselijk zijn. Deze effectpercentages zijn voor iedere case studie beoordeeld op basis van zogenaamde lineaire kwantielregressies (zie intermezzo). Wetenschappelijk kan deze keuze ter discussie worden gesteld. Zeker bij de eerste vier, in omvang beperkte datasets spelen bovengenoemde aspecten rondom pseudoreplicatie bijvoorbeeld een rol. Bij de grotere datasets van de waterschappen Aa & Maas en Rivierenland zal dit effect kleiner zijn, maar die datasets hebben weer andere aandachtspunten, zoals een beperkt aantal monsters met gemonitorde (en dan vooral de hoge) totaal ijzerconcentraties. Daarnaast is de verdeling van het aantal macrofauna monsters over de gradiënt van totaal ijzerconcentraties niet homogeen. Locaties met een relatief hoge totaal ijzerconcentratie kunnen hierdoor een naar verhouding grotere invloed op de uitkomsten hebben. Ten slotte kan ook de keuze voor een lineair model bediscussieerd worden. Zo worden de ecotoxicologische effecten van een milieuverontreinigende stof meestal met een sigmoïdale curve beoordeeld. Zo'n sigmoïdale curve past beter bij het uitgangspunt in de ecotoxicologie, dat lage concentraties van een milieuverontreinigende stof nog geen nadelige effecten hoeven te veroorzaken. Zeker voor essentiële metalen als ijzer (maar bijvoorbeeld ook koper, zink, kobalt en mangaan) is de aanwezigheid van drempelwaarden een logisch uitgangspunt⁶. Dat zijn dan echter vaak univariate studies met één stressor en één soort. De in het voorliggend rapport bestudeerde velddata omvatten daarentegen vele tientallen soorten, vele mogelijke stuurfactoren en niet alleen toxicologische effecten maar evenzo meer fysieke effecten van ijzerneerslag. Het is niet onlogisch om te veronderstellen dat al deze gezamenlijke en interacterende factoren het steeds moeilijker maken om een eenduidig onderscheid tussen een sigmoïdale of lineaire curve te maken. Daarnaast sluit de keuze voor lineaire kwantielregressies aan bij twee grotere, internationale studies naar de effecten van ijzer op de macrofauna (Linton et al, 2007; Peters et al, 2012). Hierdoor kunnen de uitkomsten beter met elkaar vergeleken worden.

INTERMEZZO KWANTIELREGRESSIES

Kwantielregressies worden toegepast om in situaties met meerdere, in sterkte variërende variabelen toch inzicht te krijgen in het effect van slechts één van deze variabelen. De achterliggende gedachte is dat de mate waarin de variabele op de x-as (bijv. totaal ijzer conc) effect heeft op de variabele op de y-as (bijv. EKR-waarde) meer inzichtelijk wordt door niet naar de gemiddelden maar juist naar de hogere percentielwaarden (bijv. P_{90}) van de verdeling te kijken. Door de



⁶ Zeer lage concentraties zouden zelfs tot een gebrek en daarmee nadelige effecten kunnen leiden.

altijd aanwezige variatie in stuurfactoren zal een 1:1 weergave van ijzerconcentraties en EKR-waarden meestal resulteren in een uitgebreide scatterplot. Datapunten onder de P_{90} -regressielijn indiceren dan situaties, waarbij niet de totaal ijzerconcentratie maar een of meerdere andere variabelen bepalend voor de EKR-waarde waren. Naarmate de ijzerconcentratie in de monsters groter wordt, zal ook het effect van ijzer steeds groter worden en gaat dit ijzer-effect uiteindelijk bepalend zijn voor de EKR-waarde (of achterliggende deelparameters). Deze techniek is eerder toegepast bij het valideren van de toxische druk middels de diversiteit van de macrofauna (zie bijgaand figuur; STOWA, 2016).

In dit soort analyses illustreert vooral de afwezigheid van datapunten in de rechter bovenhoek het effect van de variabele op de x-as. Overigens kan hierbij ook worden aangenomen, dat de hoogte van de te gebruiken percentielwaarde afhangt van het aantal variabelen. In een relatief homogene situatie, waarbij de totaal ijzerconcentratie de meest onderscheidende drukfactor is, zal het inzicht vanuit een kwantielregressie op het 90-percentiel waarschijnlijk weinig verschillen met die van een mediane of gemiddelde waarde. Naarmate de variatie onder de beoogde regressielijn groter wordt kunnen hogere percentiel waarden tot eenduidiger conclusies leiden.

De hierboven beschreven aandachtspunten van de verschillende, individuele datasets maken dat deze kwantielregressies het best op de gezamenlijke dataset kunnen worden toegepast (Hoofdstuk 3). Het storende effect van pseudoreplicatie wordt hierdoor minder groot en het aantal monsters met hoge totaal ijzerconcentraties neemt toe. Kwantitatieve (en statistische) conclusies over de ecologische effecten van ijzerrijke kwel zijn daarom uitsluitend op de analyse van de gezamenlijke dataset gebaseerd. Ook voor de zes individuele datasets (§2.2-2.7) zijn deze kwantielregressies uitgevoerd. Ondanks de aandachtspunten kunnen de inzichten de waterbeheerders nog steeds helpen bij het inschatten van de ecologische effecten in hun eigen beheergebied. Daarom is voor iedere case studie en parameter inzicht gegeven in de geschatte totaal ijzerconcentratie, die een 20% dan wel 50% reductie veroorzaakt. Gelet op bovenstaande beperkingen moet men deze waarden voorzichtig en uitsluitend als indicatie gebruiken. In de begeleidende tekst zijn de uitkomsten daarom tot concentratie ranges veralgemeniseerd.

In onderstaande paragrafen wordt voor iedere case studie achtereenvolgens ingegaan op de karakteristieken van de gebruikte dataset, een kwalitatieve beschrijving van de effecten op de macrofauna middels univariate en multivariate-analyses en een kwantificering van deze effecten middels kwantielregressies. Voor alle data-analyses is de macrofaunagemeenschap met drie parameters gekarakteriseerd. Allereerst is dat de EKR-waarde. De berekeningswijze kan weliswaar tussen watertypen verschillen, maar de EKR-waarde is een uniforme en voor alle watertypen beschikbare maat om de eventuele afwijking van de natuurlijke staat te kwantificeren. In de systematiek van de EKR-waarden zit echter ook een aandachtspunt, namelijk de keuze om de beoordeling telkens te baseren op procentuele verdelingen. Zo zou men de dichtheid van alle in een monster aangetroffen soorten kunnen halveren en toch op (ongeveer) dezelfde EKR-waarde uitkomen. Deelmaatlatten als het aandeel kenmerkende en dominant positieve soorten blijven ten slotte gelijk. Alleen bij de dichtheden kunnen kleine verschuivingen optreden doordat een halvering van aantallen kan betekenen dat de ene soort net wel en een andere soort net niet in een lagere dichtheidsklasse kan vallen. Daarom zijn de data-analyses ook uitgevoerd met het totaal aantal in een monster aanwezige soorten⁷ en met het aantal individuen van gevoelige soortgroepen. Op basis van literatuur en voorbereidende analyses aan enkele case studies is gekozen om deze 'gevoelige soortgroepen' te laten bestaan uit vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers, wetende dat er ook binnen deze groepen vast verschillen in de gevoeligheid tussen soorten bestaan. De data-analyses zijn uitgevoerd met het loga-

⁷ Taxa met een determinatieniveau van genus of hoger zijn handmatig uit de bestanden verwijderd en niet meegenomen, tenzij er binnen een bepaald aangetroffen genus geen enkel individu op soortniveau was gedetermineerd.

ritme van de aantallen individuen per monster ($^{10}\log+1$) om zo het effect van extremen te beperken.

Al met al betekent dit dat er de nodige aandachtspunten in de beschikbare data zitten en dat ook de hierbij gemaakte keuzes ter discussie gesteld kunnen worden. Dit heeft vooral invloed op de kwantitatieve inschatting van de effectconcentraties. Andere analysetechnieken kunnen zeker tot net iets andere grenswaarden leiden. Tegelijkertijd was deze pilotstudie vooral gericht op een eerste beeldvorming van zowel de aard als de hoogte van de effecten. Hiermee kunnen waterbeheerders beoordelen of deze effecten van ijzerrijke kwel een zodanig onderbelicht aspect bij hun macrofaunabeoordeling en doelaflading vormt, dat vervolg onderzoek wenselijk is. De huidige aanpak met meerdere case-studies en zowel een kwalitatieve als kwantitatieve beschrijving van de effecten sluit hierop aan.

2.2 WATERSCHAP ZUIDERZEELAND

Balangrijkste bevindingen:

- Bij toenemende totaal ijzerconcentraties daalt de EKR-waarde. Zo komen EKR-waarden boven de 0,2 niet langer voor als de totaal ijzerconcentratie groter is dan 4,5 mg/l. Ook het aantal soorten en de dichtheid van gevoelige soorten (som van de vlokreeften, kokerjuffers, haften, watermijten en libellen⁸) nemen bij toenemende totaal ijzerconcentraties af.
- Bij iedere toename van 2 á 3 mg/l aan totaal ijzer neemt de EKR-waarde met zo'n 20% af. Voor het aantal soorten en de dichtheid van gevoelige soorten gebeurt dit bij een toename van de totaal ijzerconcentratie met 4 á 5 mg/l en 0,5 á 1 mg/l respectievelijk⁹.

BESCHIKBARE DATASET

Waterschap Zuiderzeeland heeft 17 locaties geselecteerd, waarvan er zeven naar verwachting niet door ijzerrijke kwel zijn beïnvloed en tien waar dat waarschijnlijk wel het geval is (Tabel 2.1). In de controlelocaties liggen de gemiddelde totaal ijzerconcentraties tussen de 0,45 en 1,6 mg/l, terwijl de concentraties in de ijzerrijke locaties tussen de 1,6 en 7,8 mg/l variëren. Twee locaties liggen in Zuidelijk Flevoland, vijf in Oostelijk Flevoland en tien in de Noordoostpolder. Alle 17 locaties horen tot het watertype M1 (op twee na altijd M1b), waarbij Waterschap Zuiderzeeland deze 17 locaties in vier groepen heeft ingedeeld. Iedere groep bestaat uit zowel één of meerdere controle als ijzerrijke locaties, waarbij op basis van watertype, regionale ligging en breedte, locaties binnen een groep meer met elkaar dan met locaties uit de andere groepen overeenkomen. De breedte op de waterlijn varieert tussen de 6 en 14 meter met een diepte van 1-1,5 meter. Het landgebruik rond de locaties is veelal landbouw. Bij enkele locaties is er daarnaast ook sprake van beschaduwning door bomen (Voorstertocht), de aanwezigheid van wegen (Priemtocht) of beide (Noordermeertocht, Zwartemeertocht). Over de jaren 2010-2023 zijn voor deze 17 locaties in totaal 73 macrofauna-monsters beschikbaar. Per locatie gaat het meestal om vier of vijf monsters, die om de drie jaar zijn genomen.

8 De meeste soorten uit deze soortgroepen gebruiken actieve ademhaling via kieuwen. Het op kieuwen neerslaan van oxiderend ijzer kan daarmee tot een indirect effect leiden.

9 Voor deze data-analyse is een lineair model gebruikt. De 20% afname van de EKR kan dus betrekking hebben op twee locaties met een totaal ijzerconcentratie van 1 en 3 mg/l respectievelijk, maar evengoed op twee locaties met een totaal ijzerconcentratie van 3 en 5 mg/l.

TABEL 2.1 OVERZICHT VAN DE GESELECTEERDE WATERGANGEN INCLUSIEF ENKELE KARAKTERISTIEKEN. GROEPSINDELING IS UITGEVOERD DOOR HET WATERSCHAP ZUIDERZEELAND EN DUIDT OP LOCATIES, DIE OP BASIS VAN WATERTYPE, REGIONALE LIGGING EN BREEDTE ZOVEEL MOGELIJK MET ELKAAR OVEREENKOMEN

Watergang	Locatie	IJzerrijk	Groep	Watertype	IJzer conc (totaal; mg/l)	Breedte op waterlijn (m)	Oever inrichting	Ligging
Priemtocht	26DZ-012-01	Controle	1	M1b	0,45	9	NVO	Zuid-FL
Roerdomptocht	26BZ-062-01	Controle	1	M1b	1,2	10	duurzaam	Zuid-FL
Wisentocht	20HZ-069-01	IJzerrijk	1	M1b	3,5	9	NVO	Oost-FL
Elandtocht	20HN-051-01	Controle	2	M1b	0,71	9	duurzaam	Oost-FL
Rendiertocht	20HN-058-01	IJzerrijk	2	M1b	3,5	9	beschoeid	Oost-FL
Wellerzandtocht	16CN-021-01	Controle	3	M1b	1,4	6	beschoeid	NOP
Zwartemeertocht	21BZ-031-01	Controle	3	M1b	>5,0 ¹⁾	6	beschoeid	NOP
Zwijnstocht	21AZ-079-01	Controle	3	M1b	1,0	6	duurzaam	NOP
Gemaaltocht	15FZ-006-01	IJzerrijk	3	M1b	7,8	6	duurzaam	NOP
Han Stijkeltocht	20FN-125-01	IJzerrijk	3	M1b	1,6	6	duurzaam	NOP
Hannieschafttocht	20FN-124-01	IJzerrijk	3	M1b	4,4	8	duurzaam	NOP
Klutendwarstocht	15HZ-050-01	IJzerrijk	3	M1b	4,5	6	duurzaam	NOP
Noordermeertocht	15GZ-035-01	IJzerrijk	3	M1b	6,2	6	duurzaam	NOP
Polentocht	15HN-093-01	IJzerrijk	3	M1b	7,1	6	duurzaam	NOP
Voorstertocht	21AN-124-01	IJzerrijk	3	M1b	4,1	12	NVO	NOP
Oosterwoldertocht	27AN-019-01	Controle	4	M1a	1,6	14	duurzaam	Oost-FL
Oudebostocht	20CZ-022-01	IJzerrijk	4	M1a	2,6	9	duurzaam	Oost-FL

NVO = Natuurvriendelijke oever¹⁰⁾;

Zuid-FL: Zuidelijk Flevoland; Oost-FL: Oostelijk Flevoland; NOP: Noordoostpolder

¹⁾ Voor deze locatie zijn geen totaal concentraties bekend, maar de gemiddelde opgeloste ijzerconcentratie is 1,3 mg/l. Deze ligt aan de bovenkant van de range binnen de 17 locaties, waardoor wordt aangenomen dat de totaal concentraties >5,0 mg/l zijn (zie tekst voor nadere toelichting).

Voor vrijwel iedere combinatie van locatie en jaar, waarin de macrofauna is bemonsterd, zijn ook de fysisch-chemische parameters beschikbaar. De uitzonderingen zijn:

1. *Opgeloste en totaal metaal-concentraties.* In de periode 2010-2015 zijn uitsluitend totaal concentraties vastgesteld en in de periode na 2015 zijn juist alleen opgeloste concentraties gemonitord.
2. *Zwartemeertocht.* Op deze locatie zijn alleen in 2019 en 2022 macrofauna-analyses uitgevoerd, waardoor ook alleen de opgeloste metaalconcentraties bekend zijn. Voor ijzer bedroegen deze jaargemiddeld 1,3 en 1,35 mg/l, waarmee de concentraties aan de bovenkant van de range over de 17 locaties lagen. Alleen in de Gemaaltocht zijn hogere opgeloste ijzerconcentraties vastgesteld (gemiddeld 3,9 in 2021 en 4,7 mg/l in 2018). De totaal ijzerconcentraties in de Gemaaltocht lagen boven de 5,0 mg/l en ook deze lagen aan de bovenkant van de range. Naast de Gemaaltocht zijn ook in de Noordermeertocht, Polentocht en af en toe in de Klutendwarstocht en Hannie-Schafttocht totaal ijzerconcentraties boven de 5,0 mg/l vastgesteld. De opgeloste ijzerconcentraties op deze locaties varieerden tussen de 0,1 en 0,9 mg/l. Aangezien de opgeloste en totaal ijzerconcentraties niet perfect maar wel duidelijk aan elkaar zijn gecorreleerd, is aangenomen dat de totaal ijzerconcentraties in de Zwartemeertocht ook groter dan 5,0 mg/l zijn. In de dataverwerking en figuren zijn de gegevens van de Zwartemeertocht gekoppeld aan een totaal ijzerconcentratie van 5,0 mg/l.
3. Voor de jaren na 2015, waarvoor geen totaal ijzerconcentraties bekend zijn, is de gemiddelde concentratie over de jaren vóór 2016 gebruikt.

- 10 Waar een duurzame oever een vast profiel heeft, kan die bij een natuurvriendelijke oever verschillende vormen hebben. Zo kan het profiel nog flauwer zijn dan die van een duurzame oever, maar kan een NVO ook een onverdedigde oever met afgekald talud inhouden.

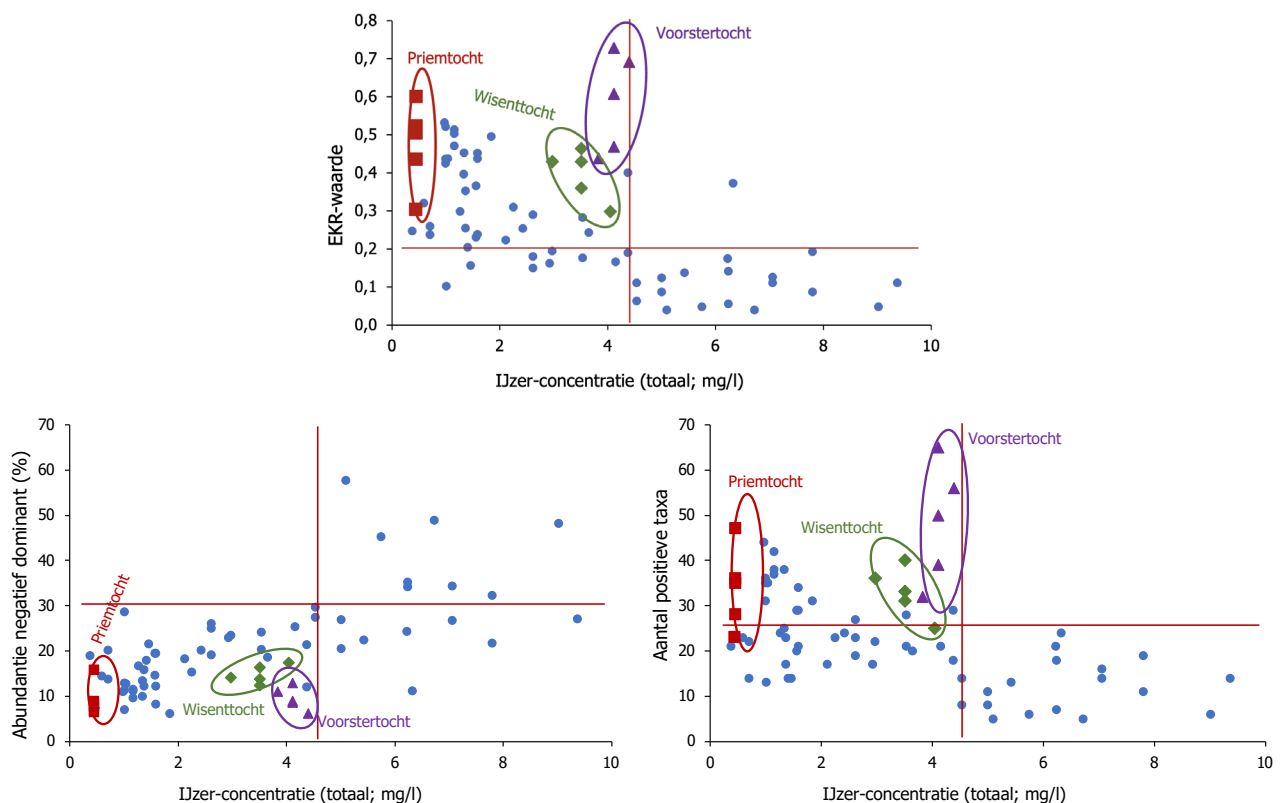
KWALITATIEVE KARAKTERISERING

De EKR-waarde daalt bij toenemende totaal ijzerconcentraties (Figuur 2.1). Deze afname is gekoppeld aan zowel een stijgende abundantie van negatief dominante taxa als een daling van de positieve taxa¹¹. Naast deze gemiddelde daling van de EKR-waarde vallen in figuur 2.1 ook enkele meer specifieke aspecten op. Zo liggen (op één na) alle EKR-waarden onder de 0,2 als de totaal ijzerconcentratie groter is dan 4,5 mg/l. De enige uitzondering is de Hannie-Schafttocht in 2012 met een EKR-waarde van 0,37 bij een totaal ijzerconcentratie van 6,3 mg/l. Opvallend hierbij is dat in 2015 de jaargemiddelde totaal ijzerconcentratie slechts 2,4 mg/l bedroeg. Als deze variatie tussen 2012 en 2015 ook zou gelden voor de jaren voorafgaand aan de monsternamen van de macrofauna in 2012¹², zou de totaal ijzerconcentratie van 6,3 mg/l weleens een onterecht hoge concentratie geweest kunnen zijn. Ook de hoge EKR-waarden in de Voorstertocht bij totaal ijzerconcentraties rond de 4,0 mg/l zijn opvallend. Dit is mogelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van een natuurvriendelijke oever. Ook de twee andere locaties met een natuurvriendelijke oever (Priemtocht en Wisenttocht) hebben relatief hoge EKR-waarden in vergelijking tot locaties met een ongeveer vergelijkbare totaal ijzerconcentratie.

FIGUUR 2.1

BOVENSTE FIGUUR: RELATIE TUSSEN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE (X-AS; mg/l) EN DE EKR-WAARDE VOOR ALLE 73 INDIVIDUELE MACROFAUNA-MONSTERS.

ONDERSTE TWEE FIGUREN: DEZELFDE RELATIE VOOR DE TWEE ACHTERLIGGENDE PARAMETERS (LINKS: ABUNDANTIE-% VAN DE NEGATIEF DOMINANTE TAXA, DN% EN RECHTS HET AANTAL POSITIEVE TAXA, PT). IN DE DATASET ZITTEN DRIE LOCATIES MET EEN NATUURVRIENDELIJKE OEVER, NAMELIJK DE PRIEMTOCHT, WISENTTOCHT EN VOORSTERTOCHT. DEZE ZIJN APART AANGEDUID. DE RODE LIJNEN ZIJN INDICATIEVE ILLUSTRATIES VAN VERSCHILLEN. ZIE TEKST VOOR NADERE TOELICHTING



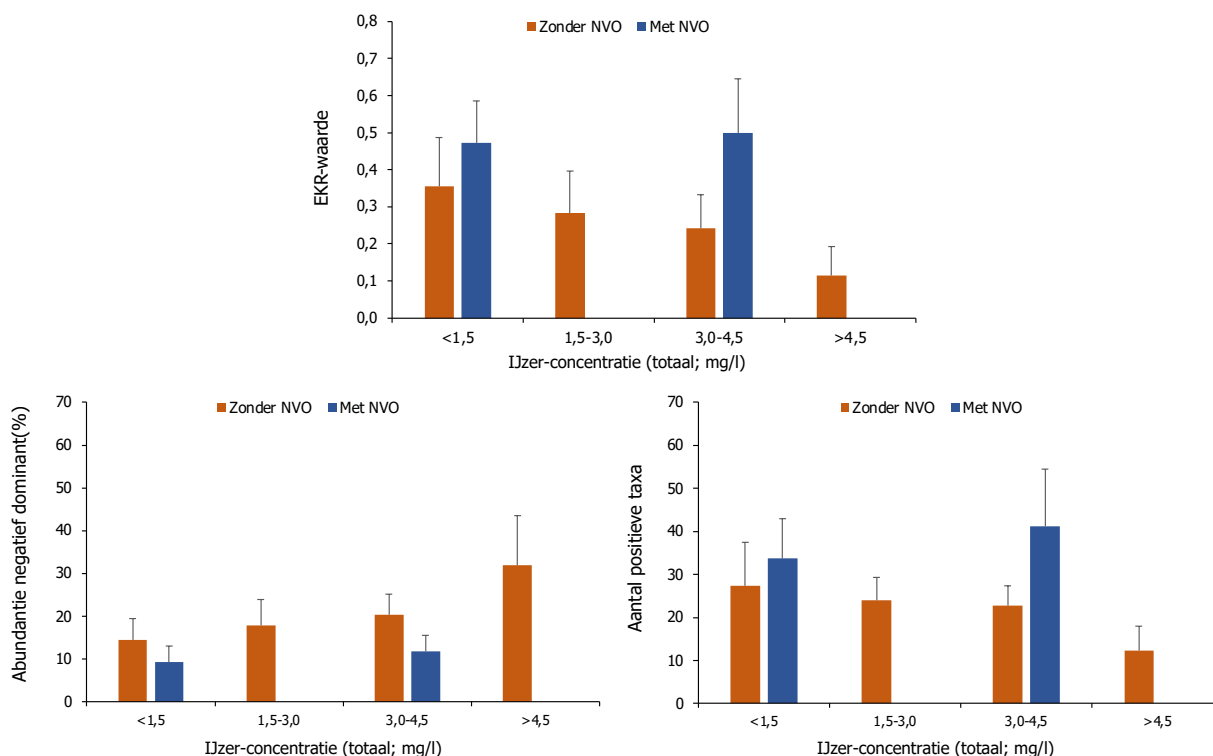
11 Dit beeld komt ook naar voren als naar locatie gemiddelde waarden wordt gekeken (het aantal macrofauna-monsters per locatie is niet overal gelijk).

12 De levensgemeenschap zal veelal een resultaat zijn van de waterkwaliteit en omstandigheden in de paar voorafgaande jaren.

Deze visuele knip in de EKR-waarden bij een totaal ijzerconcentratie van 4,5 mg/l komt ook naar voren in zowel de abundantie van negatief dominante soorten (DN% >30 komen alleen voor bij concentraties >4,5 mg/l) als in het aantal positieve taxa (altijd lager dan 25 bij concentraties >4,5 mg/l). Dit duidt op een situatie, waarbij ijzerrijke kwel een dominant effect op de macrofauna heeft zodra de totaal ijzerconcentratie groter is dan 4,5 mg/l. Ook bij lagere totaal ijzerconcentraties lijken er echter effecten op de macrofaunagemeenschap waarneembaar. Zo illustreert figuur 2.2 dat er bij toenemende totaal ijzerconcentraties een geleidelijke verandering in zowel de EKR-waarde als de twee achterliggende deelmaatlaten plaatsvindt. Voor deze figuur zijn de locaties op basis van hun gemiddelde totaal ijzerconcentratie in vier categorieën ingedeeld en daarna per categorie gemiddeld.

FIGUUR 2.2

ALS FIGUUR 2.1 VOOR INDIVIDUELE MONSTERS MAAR NU MET EEN INDELING IN VIER CATEGORIEËN OP BASIS VAN DE GEMIDDELTE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE EN EEN VERDER ONDERSCHIED VOOR DE AL DAN NIET AANWEZIGE NATUURVRIENDELIJKE OEVER (NVO). WAARDEN BETREFFEN DE GEMIDDELDEN PLUS DE STANDAARD AFWIJING



Om de samenhang tussen de onderzochte locaties, de aangetroffen soorten en de verklarende parameters in beeld te brengen is een multivariate-analyse (CCA) uitgevoerd, waarbij de verklarende parameters via voorwaartse selectie zijn geselecteerd. Hierbij wordt telkens de parameter met de dan grootste toegevoegde waarde aan het model toegevoegd en de selectie wordt gestopt als een volgende parameter geen duidelijke verbetering meer teweegbrengt. Uit het resulterende figuur 2.3 komen een aantal aspecten naar voren:

- De hierboven gehanteerde, pragmatische indeling van de macrofauna-monsters in vier groepen op basis van alleen de totaal ijzerconcentratie (zie figuur 2.2) blijkt goed overeen te komen met de multivariate ordening op basis van de aangetroffen macrofaunagemeenschap. Zo liggen vrijwel alle controlelocaties ($Fe < 1,5$ mg/l; groene cirkels) aan de rechterkant van de figuur, liggen alle locaties met een totaal ijzerconcentratie boven de 4,5 mg/l zeer dicht bij elkaar aan de linkerkant en liggen de meeste macrofauna-monsters met een tussenliggende ijzerconcentratie ook tussen deze twee groepen in (net iets links van het middelpunt). Verder bevestigt de multivariate-analyse dat de

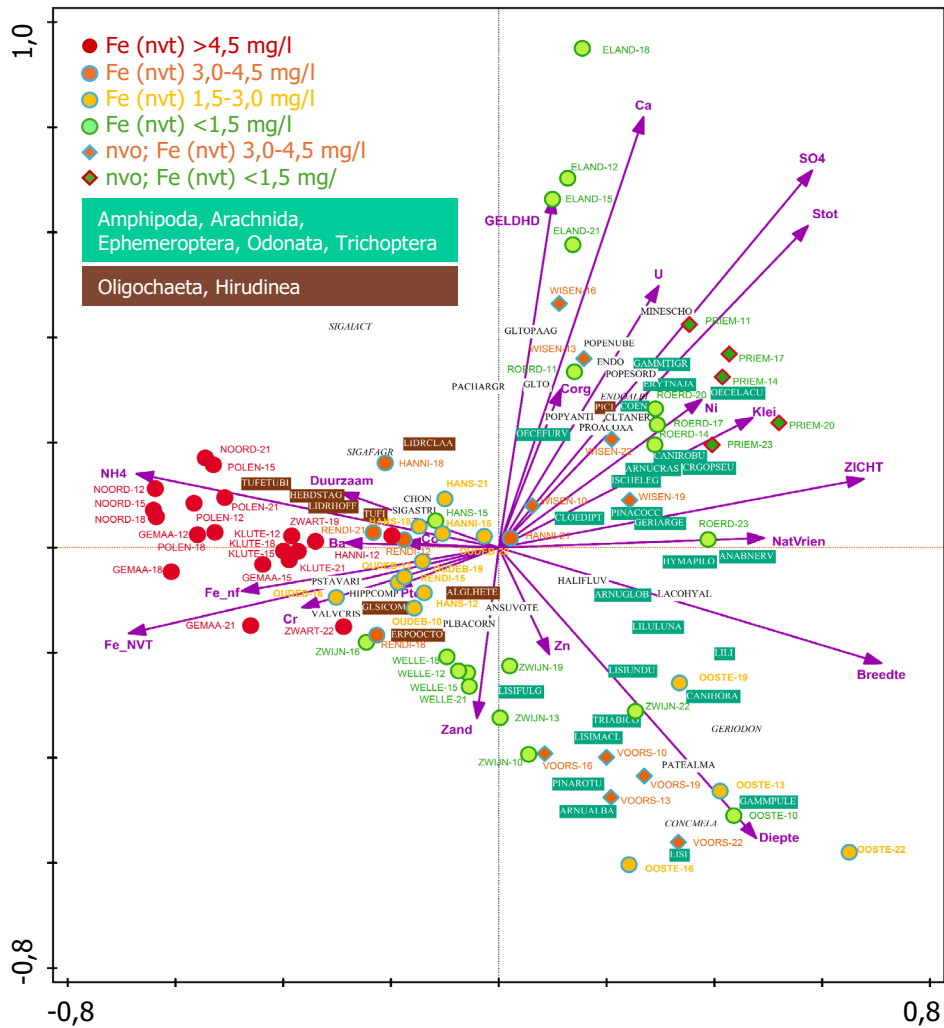
belangrijkste verklarende parameters voor deze ordening van macrofauna-monsters zijn gelegen in de totaal ijzerconcentratie en de hieraan gecorreleerde parameters opgelost ijzer, NH₄ en doorzicht (doorzicht staat aan de rechterkant van de figuur aangezien hoge ijzerconcentraties tot een lager doorzicht leiden).

- Overeenkomstig met bovenstaande bevindingen op basis van figuur 2.2 laat deze multivariate-analyse eveneens zien, dat er ook bij totaal ijzerconcentraties tussen de 1,5 en 4,5 mg/l veranderingen in de macrofaunagemeenschap optreden. Ook in dit geval geven de uitzonderingen aan, dat een dergelijke verandering door andere factoren kan worden genivelleerd. Zo liggen alle vijf macrofauna-monsters uit de met totaal ijzer belaste Voorstertocht (Fe: 3,0-4,5 mg/l) aan de rechterkant van de y-as, wat mogelijk een gevolg is van de aanwezigheid van een natuurvriendelijke oever. Ook de andere locatie, die met ijzer is belast én een natuurvriendelijke oever heeft (Wisenttocht), ligt aan de rechterkant van de y-as (maar in dit geval boven de x-as waar de Voorstertocht juist onder de x-as ligt). Ook de licht met ijzer belaste Oosterwoldertocht (Fe: 1,5-3,0 mg/l) neemt een afwijkende plaats in het diagram in en groepeer meer met de controlelocaties dan met de andere, licht met ijzer belaste locaties. Dit is mogelijk gecorreleerd aan een grotere breedte van de watergang (14m), zoals dat ook voor de Voorstertocht (12m) geldt¹³.

13 De breedte is geen stuurfactor maar een locatiekenmerk. De breedte van een watergang kan wel aan allerlei stuurfactoren correleren, zoals het aantal beschikbare habitats, de stroomsnelheid of mate van beschaduwing. Welke hiervan de bepalende stuurfactoren zijn vraagt om een andere analyse. In het voorliggend rapport wordt alleen gekeken of er boven op de variatie door andere stuurfactoren ook een effect van ijzer is te onderscheiden. Voor de eenvoud worden allerlei aan breedte gecorreleerde stuurfactoren in de rest van onderstaande tekst onder de term 'breedte van de watergang' samengevat. De term breedte is dus niet bedoeld als causaal aangetoonde factor. Dit geldt ook voor de andere case studies.

FIGUUR 2.3

MULTIVARIATE CCA-ANALYSE VAN DE CASE STUDIE BIJ WATERSCHAP ZUIDERZEELAND. PARAMETERS ZIJN GESELECTEERD MIDDELS VOORWAARTSE SELECTIE. VERKLAARDE VARIANTIE: 17,8% ¹⁴



- Ten slotte geeft deze analyse ook inzicht in de meest onderscheidende soorten. Zo blijkt dat de onderscheidende bloedzuigers en oligochaete wormen (vrijwel) allemaal groeperen nabij de locaties met verhoogde totaal ijzerconcentraties (soortcodes op een bruine achtergrond). Onderscheidende soorten binnen de groepen van vlokreeften, kokerjuffers, haften, watermijten en libellen (soortcodes op een groene achtergrond) groeperen juist met de controlelocaties aan de rechterkant van de figuur. Dit verschil in de soortsaanpak is in figuur 2.4 nader geïllustreerd op basis van het gemiddeld aantal individuen¹⁵, dat voor ieder van deze soortgroepen in een monster is aangetroffen. Deze figuur is gebaseerd op 58 macrofauna-monsters, afkomstig van de 14 locaties waar geen natuurvriendelijke oever aanwezig was. Deze figuur illustreert dat het geleidelijk toenemende effect bij toenemende totaal ijzerconcentraties in sterkere mate wordt veroorzaakt door dalende aantallen vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers dan door toenemende aantallen bloedzuigers en oligochaete wormen¹⁶. Dit verschil betreft vooral de groep monsters met een totaal ijzerconcentratie tussen de 1,5 en 3,0 mg/l.

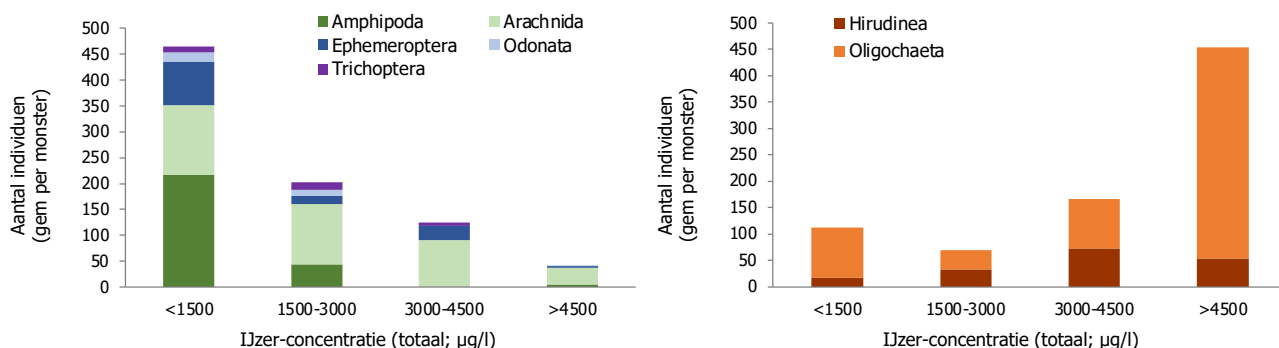
¹⁴ *Amphipoda* = vlokreeften; *Arachnida* = watermijten; *Ephemeroptera* = haften; *Odonata* = libellen; *Trichoptera* = kokerjuffers

¹⁵ De KRW-maatlat werkt qua abundantie met percentages en is daarmee gevoelig voor veranderingen in de onderlinge verhouding van soorten of soortgroepen, maar niet of minder in effecten op de dichtheid zelf. Daarom is aanvullend ook naar het absolute aantal individuen per monster gekeken.

¹⁶ Ook het aantal schelpdieren, pissebedden en (in enige mate) slakken vertoont een dalende trend bij toenemende totaal ijzerconcentraties.

Noot. Het benoemen van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers als gevoelige soortgroepen is, zoals gezegd, gestoeld op de door de multivariate analyse geïdentificeerde meest onderscheidende soorten en blijkt voor Waterschap Zuiderzeeland een werkzame indeling te geven. Deze indeling in gevoelige soortgroepen wordt daarom ook voor de andere case studies gehanteerd. Tegelijkertijd betreft de stap van gevoelige soorten naar gevoelige soortgroepen een veralgemenisering, die niet overal en voor iedere soort in even sterke mate hoeft op te gaan. Aan de andere kant zijn er in de literatuur vele studies te vinden, die bevestigen dat de zogenaamde EPT-taxa (E=*Ephemeroptera*, haften; P=*Plecoptera*, steenvliegen; T=*Trichoptera*, kokerjuffers) gevoelig reageren op metaal verontreiniging (e.g. Clements, 2004; Hickey & Clements, 2009; Maret et al., 2003). Desondanks hoeft dit voor de thans bestudeerde situatie met ijzerrijke kwel en (vooral) fysieke effecten van ijzerneerslag niet te betekenen, dat andere soortgroepen niet ook gevoelig op deze stressor kunnen reageren¹⁷. Dit zou bijvoorbeeld ook voor schelpdieren kunnen gelden. Zo bleek tijdens het uitvoeren van biotamonitoring dat er in grote delen van de Noordoostpolder nauwelijks schelpdieren aanwezig waren, dat in netjes uitgehangen Quaggamosselen binnen enkele weken kwamen te overlijden en dat ook in een kleinschalig laboratorium experiment werd geconstateerd dat Quaggamosselen uit het IJsselmeer binnen een week of twee kwamen te overlijden als ze in ijzerrijk oppervlaktewater uit de Noordoostpolder werden gehouden (Ecofide, niet gepubliceerd). Ten slotte laat de case studie bij Waterschap Hunze en Aa's (§2.5) zien, dat binnen de genoemde gevoelige soortgroepen (vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers) de kenmerkende en positief dominante taxa gevoeliger op verhoogde totaal ijzerconcentraties reageren dan de negatief dominante en niet-indicerende soorten.

FIGUUR 2.4 GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER VOOR ENKELE POSITIEF INDICERENDE TAXA-GROEPEN (LINKS) EN TWEE NEGATIEF INDICERENDE TAXA-GROEPEN. DE FIGUUR IS GEBASEERD OP 58 MACROFAUNA-MONSTERS, AFKOMSTIG VAN DE 14 LOCATIES WAAR GEEN NATUURVRIENDELIJKE OEVER AANWEZIG WAS



KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

Ten slotte zijn op basis van alle 73 monsters lineaire kwantielregressies (programma XLSTAT) uitgevoerd om dit effect van totaal ijzer globaal¹⁸ te kwantificeren. Hierbij is niet alleen naar de EKR-waarden gekeken maar ook naar het aantal soorten per monster en de dichtheid van gevoelige soorten (vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers). Daarnaast zijn de berekeningen telkens twee keer uitgevoerd. In het eerste model is alleen de totaal ijzerconcentratie als verklarende variabele meegegeven. In het tweede model is naast de totaal ijzerconcentratie ook het al dan niet aanwezig zijn van een natuurvriendelijke oever als verklarende variabele meegegeven (aangezien deze variabele een belangrijke invloed op de meetwaarden bleek te hebben). Voor iedere berekening is eerst gekeken naar de hoogte van de

¹⁷ Gevoeligheid in een multivariate analyse wordt niet alleen door de intrinsieke gevoeligheid van soorten bepaald, maar ook door het onderscheidend vermogen van de gegevens wat weer een gevolg kan zijn van de soortenrijkdom binnen een groep en de aanwezige dichtheden.

¹⁸ Zie opmerkingen rondom de data-analyses en beperkingen hiervan in §2.1

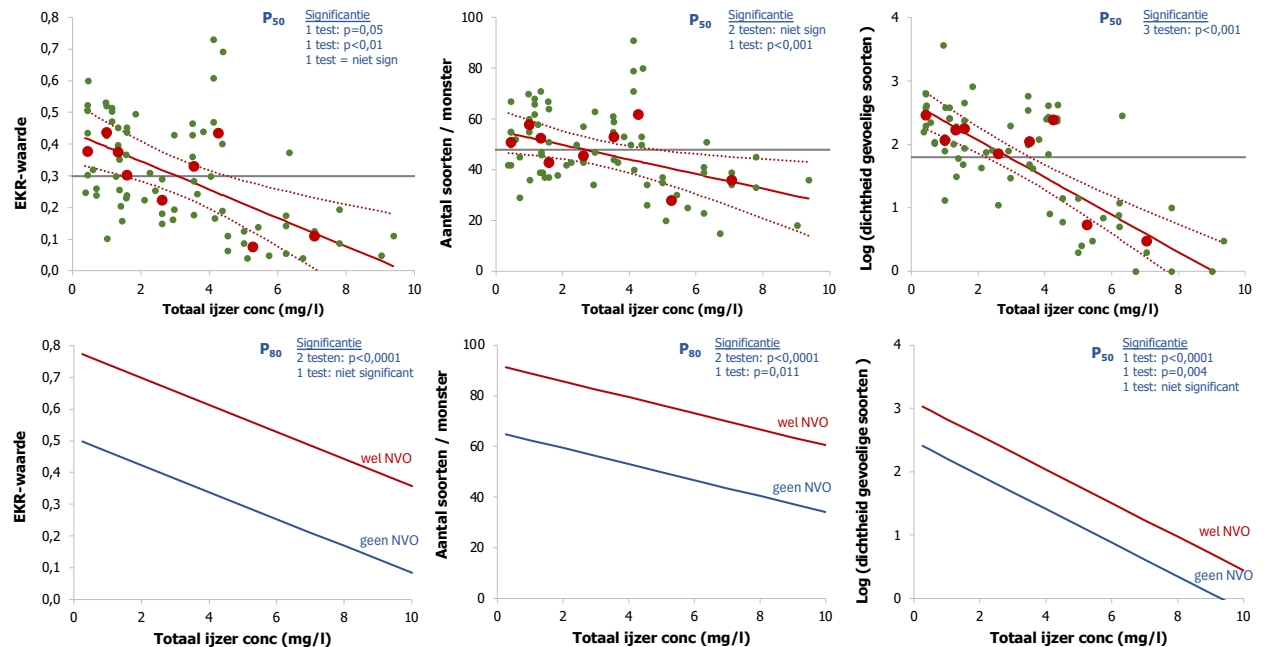
te gebruiken percentielwaarden (oplopend van een P_{50} tot een P_{95}), waarna de modelberekening telkens op de percentiel waarde met de beste fit is gebaseerd. Vervolgens gebruikt XLSTAT drie testen om na te gaan of het (multi) lineaire model een statistisch significant effect van de verklarende variabelen oplevert¹⁹. De resultaten zijn in figuur 2.5 geïllustreerd, waarbij voor iedere optie telkens ook de gekozen percentiel-waarde is aangeduid. Ter illustratie zijn in de figuren, waarin alleen de totaal ijzer als variabele is meegegeven, ook de handmatig berekende percentiel-waarden opgenomen (de op totaal ijzer geordende monsters zijn hierbij ingedeeld in het aantal bins, gelijk aan de wortel van het aantal monsters; de wortel van 73 is 8,5). Voor de situatie met twee variabelen kan deze berekening niet worden uitgevoerd.

FIGUUR 2.5

KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), HET AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN DE LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS).

BOVENSTE FIGUREN: GROENE PUNTEN GEVEN DE MEETWAARDEN. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEE GESTIPPELDE RODE LIJNEN HET 95% BETROUWBAARHEIDINTERVAL. DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET. DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS.

ONDERSTE FIGUREN: DE BEREKENDE LINEAIRE REGRESSIELIJN IS GEÏLLUSTREERD VOOR ZOWEL DE SITUATIE MET EEN NVO ALS ZONDER NVO



Ten slotte zijn de uitkomsten samengevat in tabel 2.2, waarbij telkens de totaal ijzerconcentratie is berekend die tot 20% of 50% afname leidt. Ook is berekend hoeveel afname optreedt als de totaal ijzerconcentratie met 1 mg/l wordt verhoogd. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken:

- De dichtheid van de gevoelige soorten is de meest gevoelige parameter, gevolgd door de EKR-waarde en daarna het aantal soorten. Bij een totaal ijzerconcentratie van 0,5 á 1 mg/l is deze dichtheid van gevoelige soorten met 20% afgenomen²⁰.

¹⁹ Maximum likelihood, Lagrange Multiplier en de Wald test. Ook bij deze significantie testen moeten de aandachtspunten uit §2.1 in ogenschouw genomen worden. De uitkomsten zijn daarom louter gebruikt als kwalitatieve indicatie van de sterkte van het waargenomen effect en geven geen antwoord op de vraag of er sprake is van een statistisch significant effect. Zo blijkt dat hoe verder de bovengrens van het model onder de horizontale grijze lijn van het gemiddelde zakt, hoe 'significanter' de model-fit is.

²⁰ Dit in vergelijking met de waarde bij $x=0$ (as-afsnede). In de praktijk zou men deze concentratie ook kunnen optellen bij de totaal ijzerconcentratie in controle locaties (aangezien de ijzerconcentratie nooit 0 zal zijn).

- De in tabel 2.2 opgenomen effectpercentages laten enige verschillen zien tussen het model met alleen de totaal ijzerconcentraties en dat waarbij ook de aanwezigheid van natuurvriendelijke oevers is meegenomen. Gelet op de, hierboven al besproken, onzekerheden rondom deze berekeningen worden deze verschillen niet als betekenisvol beschouwd.

TABEL 2.2 OVERZICHT VAN DE VOOR WATERSCHAP ZUIDERZEELAND BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC₂₀ EN EC₅₀-WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, HET AANTAL SOORTEN EN DE DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	Model	P _{xx} waarde	EC ₂₀ (mg/l Fe _{tot})	EC ₅₀ (mg/l Fe _{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer ¹⁾
EKR-waarde	Fe	P ₅₀	1,9	4,9	0,045 EKR-waarde
	Fe + NVO	P ₈₀	2,6	6,1	0,043 EKR-waarde
Aantal soorten	Fe	P ₅₀	3,9	9,6	2,9 soorten
	Fe + NVO	P ₈₀	4,4	10,5	3,2 soorten
Dichtheid gevoelige soorten ²⁾	Fe	P ₅₀	0,33	1,1	56 individuen
	Fe + NVO	P ₅₀	0,61	1,4	16 individuen

¹⁾ De effectschattingen zijn gebaseerd op een lineair model en kan dus betrekking hebben op twee locaties met een totaal ijzerconcentratie van respectievelijk 1 dan wel 2 mg/l maar evenzo op twee locaties met totaal ijzerconcentraties van 4 en 5 mg/l.

²⁾ Het model (figuur 2.5) is gefit op het logaritme van het aantal individuen. Voor deze effect percentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

2.3 WATERSCHAP DE DOMMEL

Balangrijkste bevindingen:

- Bij toenemende totaal ijzerconcentraties daalt de EKR-waarde. Zo komen EKR-waarden boven de 0,5 niet langer voor als de totaal ijzerconcentratie groter is dan 3 mg/l. Ook de dichtheid van gevoelige soorten (som van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers) daalt bij toenemende totaal ijzerconcentraties, terwijl er voor het totaal aantal soorten geen sprake van een eenduidig effect was. Dit is mogelijk beïnvloed door de in omvang beperkte dataset (10 locaties met 46 monsters) en een heterogene verdeling van de monsters over de totaal ijzerconcentraties (twee locaties >10 mg/l en de andere acht tussen de 1,7 en 3,2 mg/l).
- Gelet op bovenstaande aandachtspunten hebben de berekende effectpercentages een grotere onzekerheid. Bij iedere toename van zo'n 8 mg/l aan totaal ijzer neemt de EKR-waarde met zo'n 20% af. Voor de dichtheid van de gevoelige soortgroepen gebeurt dit zo ongeveer rond de 0,5 á 2 mg/l.

BESCHIKBARE DATASET

Waterschap De Dommel heeft uit acht watergangen tien monitoringslocaties geselecteerd (Tabel 2.3). Voor acht locaties zijn zowel macrofauna-inventarisaties als fysisch-chemische parameters beschikbaar. Voor de Goorloop en Run is er voor de macrofauna een ander meetpunt dan voor de fysisch-chemische parameters, maar zijn beide meetpunten onderling wel goed vergelijkbaar. Het meetpunt in de Poppelsche Leij is de enige controlelocatie met een totaal ijzerconcentratie van 1,7 mg/l. Het verschil is echter klein, aangezien de gemiddelde totaal ijzerconcentratie voor de negen met ijzerrijke kwel belaste locaties veelal tussen de 2,3 en 3,2 mg/l ligt. Uitzonderingen zijn het Dalemstroompje en de Goorloop waar de totaal ijzerconcentraties groter zijn dan 10 mg/l. Het watertype is in alle gevallen R4. De breedte van de locaties varieert tussen de 1 en 7 meter, waarbij de waterdiepte veelal zo'n 20-50 cm bedraagt (in de Rielloop is deze 90 cm).

Voor de tien locaties zijn over de jaren 2000-2023 in totaal 111 macrofauna-monsters beschikbaar, waarvan er 46 voor de huidige studie zijn geselecteerd. Dit zijn allereerst alle monsters,

waarvoor er fysisch-chemische analyses uit hetzelfde jaar beschikbaar waren. Dit betreft 38 locatie*jaar (en soms voor/najaar) combinaties, waarvan er veel afkomstig zijn uit de Keersop (n=9), Rielloop (n=10) en Poppelsche Leij (n=6). Voor het Dalemstroompje, de Goorloop, de drie locaties in de kleine Beerze en de Raamsloop leverde deze keuze telkens 1 of 2 locatie*jaar combinaties op. Vanwege de verwachte variatie tussen individuele macrofauna-monsters zijn in die gevallen 1 of 2 aanvullende macrofauna-monsters uit andere jaren geselecteerd, waarbij voor de fysisch/chemische gegevens van het dichtstbij gelegen meetjaar (of het gemiddelde van twee meetjaren bij een tussenliggende situatie) gebruik is gemaakt. Hierdoor zijn er voor alle locaties ten minste drie macrofauna-monsters in de data-analyse opgenomen.

TABEL 2.3 OVERZICHT VAN DE GEBRUIKTE LOCATIES INCLUSIEF ENKELE KARAKTERISTIEKEN

Waterlichaam	Watergang	Locatie MaFA ¹⁾	Locatie Chemie ¹⁾	IJzerrijk	Watertype	IJzer-conc (totaal; mg/l)	Breedte op waterlijn (m)	Diepte (m)
NL27_L_1_2	Poppelsche Leij	250113	240113	Controle	R4	1,7	3,0	0,2
NL27_B_1_2	Dalemstroompje	250080	240080	IJzerrijk	R4	10,9	1,5	0,4
	Goorloop	250073	249812	IJzerrijk	R4	11,2	1,0	0,2
NL27_B_2_2	Kleine Beerze	250084	240084	IJzerrijk	R4	2,7	2,5	0,2
		251080	241080	IJzerrijk	R4	2,5	2,0	0,3
		251081	241081	IJzerrijk	R4	3,0	0,9	0,3
NL27_B0_2_2	Run	251039	240037	IJzerrijk	R4	2,5	2,0	0,5
NL27_B0_3_2	Keersop	250036	240036	IJzerrijk	R4	2,3	7,0	0,3
NL27_KD_3_2	Rielloop	250049	240049	IJzerrijk	R4	3,0	1,0	0,9
NL27_R_1_2	Raamsloop	250108	240108	IJzerrijk	R4	3,2	6,0	0,5

¹⁾ Als de locatie-codes van macrofauna en chemie naar rechts zijn uitgelijnd betreft het twee fysiek verschillende meetlocaties binnen dezelfde watergang. In de andere gevallen betreft het dezelfde locatie, waarbij de macrofauna codes met 25 en de chemie code met 24 beginnen.

KWALITATIEVE KARAKTERISERING

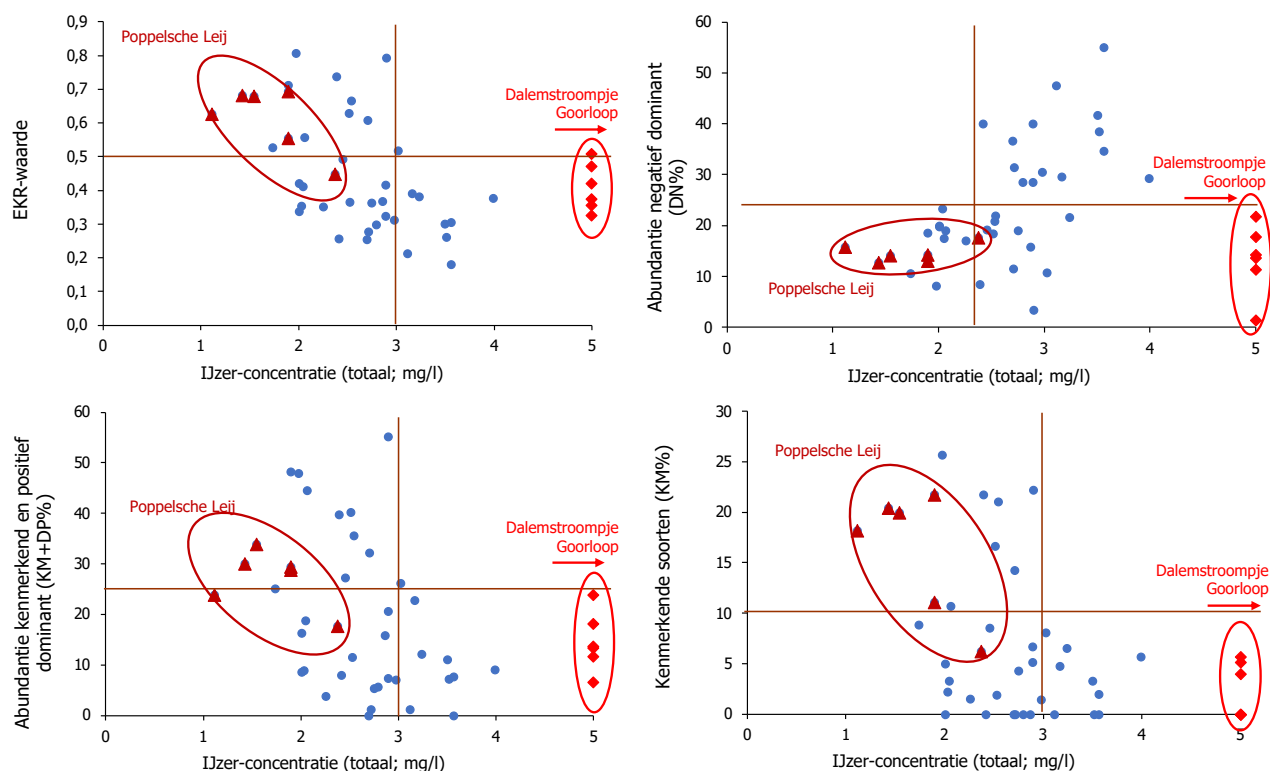
Bij acht van de tien locaties varieert de gemiddelde totaal ijzerconcentratie niet meer dan een factor twee. Ondanks deze geringe variatie nemen de EKR-waarden gemiddeld genomen af bij toenemende totaal ijzerconcentraties (Figuur 2.6). Als ook naar de (apart weergegeven) resultaten van het Dalemstroompje en de Goorloop wordt gekeken dan blijkt dat deze dalende trend bij hogere totaal ijzerconcentraties niet doorzet (de regressielijn zou vanaf ongeveer 5,0 mg/l negatief worden). Het effect van ijzerrijke kwel op de macrofauna is vooral zichtbaar vanuit het feit dat EKR-waarden boven de 0,5 niet langer voorkomen als de totaal ijzerconcentratie groter is dan 3 mg/l. Bij lagere totaal ijzerconcentraties varieert de EKR-waarde tussen de 0,25 en 0,81 en spelen ook andere stuurfactoren een rol in de macrofaunagemeenschap. Iets vergelijkbaars is logischerwijs terug te zien bij de drie achterliggende deelmaatlaten, namelijk de abundantie van negatief dominante soorten (DN%), de abundantie van kenmerkende en positief dominante soorten (KM%+DP%) en het aantal kenmerkende soorten (KM%):

KM%:	boven een totaal ijzerconcentratie van 3,0 mg/l is het KM% altijd kleiner dan 10%
KM%+DP%:	boven een totaal ijzerconcentratie van 3,0 mg/l is het KM%+DP% altijd kleiner dan 25%
DN%:	onder een totaal ijzerconcentratie van 2,4 mg/l is het DN% altijd kleiner dan 23%

Deze abundantie van de dominant negatieve taxa geeft een positief verband met totaal ijzerconcentraties tot aan zo'n 4,0 mg/l. De gegevens van het Dalemstroompje en de Goorloop

wijken echter opvallend af, aangezien het DN% in al deze monsters niet boven de 25% uitkomt.

FIGUUR 2.6 RELATIE TUSSEN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIES (X-AS; MG/L) EN RESPECTIEVELIJK DE EKR-WAARDE (LINKSBOVEN) EN DE DRIE ACHTERLIGGENDE DEELMAATLATTEN (DN%; KM+DP% EN KM%) VOOR ALLE 46 INDIVIDUELE MACROFAUNA-MONSTERS. DE RODE LIJNEN ZIJN INDICATIEVE ILLUSTRATIES VAN VERSCHILLEN. VANWEGE DE HOGE TOTAAL IJZERCONCENTRATIES ZIJN DE GEGEVENS VOOR HET DALEMSTROOMPJE EN DE GOORLOOP NIET OP DE X-AS GESCHAALD



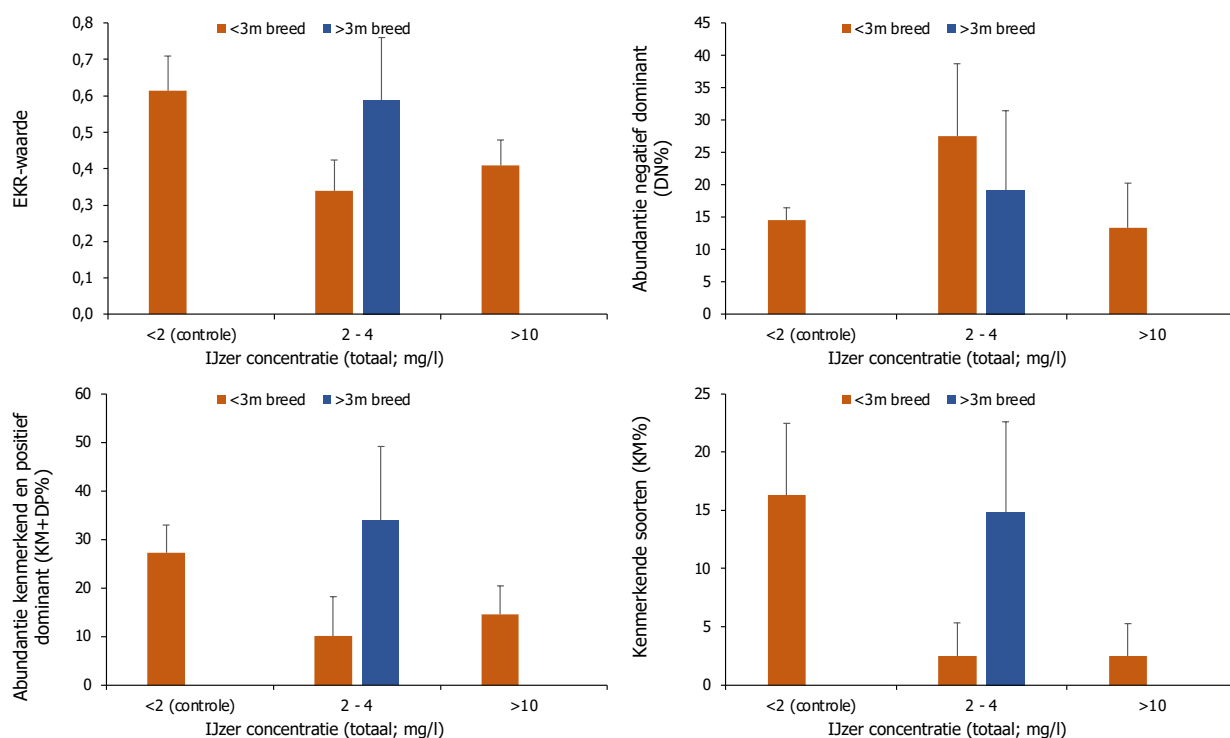
Om inzicht te krijgen in de vraag of deze verschillen monster of locatie afhankelijk zijn, is ook naar de locatiegemiddelde waarden gekeken. Voor de EKR-waarde vallen dan vooral de hoge waarden in de bredere Poppelsche Leij en de Keersop op ($\pm 0,6$). Voor de andere met ijzer belaste locaties varieert de locatie gemiddelde EKR-waarde tussen de 0,27 en 0,42 en is er geen sprake van een dalend verloop bij hogere totaal ijzerconcentraties. Aangezien de totaal ijzerconcentratie in de met ijzer belaste Keersop (2,3 mg/l) nauwelijks verschilt van de totaal ijzerconcentraties in de Run en de drie locaties in de Kleine Beerze (2,5-3,0 mg/l), lijken de afwijkend hoge EKR-waarden in de Keersop door andere variabelen te zijn veroorzaakt. Een waarschijnlijke kandidaat is de breedte van de watergang²¹, aangezien die bij de Keersop met 7m beduidend groter is dan de 1-2,5m in de Run en Kleine Beerze (Tabel 2.3). De breedte van de controlelocatie in de Poppelsche Leij is 3m en komt daarmee beter met de andere locaties overeen. Alleen de Raamsloop heeft een met de Keersop vergelijkbare breedte (6m). Om voor dit effect van breedte te corrigeren zijn de 46 macrofauna-monsters op basis van hun totaal ijzerconcentraties in drie categorieën ingedeeld (<2 (controle); 2-4 en >10 mg/l) met een aanvullend onderscheid op basis van de breedte (<3m dan wel >3m; Figuur 2.7).

²¹ De breedte is geen stuurfactor maar een locatiekenmerk. De breedte van een watergang kan wel aan allerlei stuurfactoren correleren, zoals het aantal beschikbare habitats, de stroomsnelheid of mate van beschaduwing. Welke hiervan de bepalende stuurfactoren zijn vraagt om een andere analyse. In het voorliggend rapport wordt alleen gekeken of er boven op de variatie door andere stuurfactoren ook een effect van ijzer is te onderscheiden. Voor de eenvoud worden allerlei aan breedte gecorreleerde stuurfactoren in de rest van onderstaande tekst onder de term 'breedte van de watergang' samengevat. De term breedte is dus niet bedoeld als causaal aangetoonde factor.

De gegevens van locaties breder dan 3m betreffen daarmee de Keersop en Raamsloop en de controle zijn de gegevens van de Poppelsche Leij. Zo wordt duidelijk dat de smalle, met ijzerrijke kwel belaste locaties een duidelijk lagere EKR-waarde hebben dan de controlelocatie in de Poppelsche Leij en hetzelfde geldt voor (vrijwel) alle drie achterliggende deelmaatlatten. Hier zijn drie opmerkingen bij te maken:

- De controle bestaat nu louter uit gegevens van de Poppelsche Leij, terwijl de totaal ijzerconcentraties slechts weinig verschillen met de meeste andere locaties. Gelet op het grote verschil in de EKR-waarde (en de achterliggende deelmaatlatten) kan dit niet eenduidig als een effect van alleen de ijzerrijke kwel gezien worden. Het lijkt waarschijnlijk dat de Poppelsche Leij ook op andere factoren verschilt met de andere smalle locaties.
- De abundantie van de negatief dominante soorten is bij de meeste smalle locaties conform verwachting hoger dan in de controle. Ook hier valt echter weer op dat deze abundantie bij het Dalemstroompje en de Goorloop opvallend laag is.
- Voor zover deze verschillen (mede) door de ijzerrijke kwel zijn veroorzaakt, laten de Keersop en Raamsloop zien dat zo'n effect gecompenseerd kan worden met andere factoren (in dit geval breedte), die de macrofaunagemeenschap juist positief beïnvloeden. Of zo'n compensatie ook mogelijk is voor het Dalemstroompje en de Goorloop met beduidend hogere totaal ijzerconcentraties kan niet worden beoordeeld omdat er geen brede R4-locaties zijn geselecteerd met een vergelijkbare totaal ijzerconcentratie.

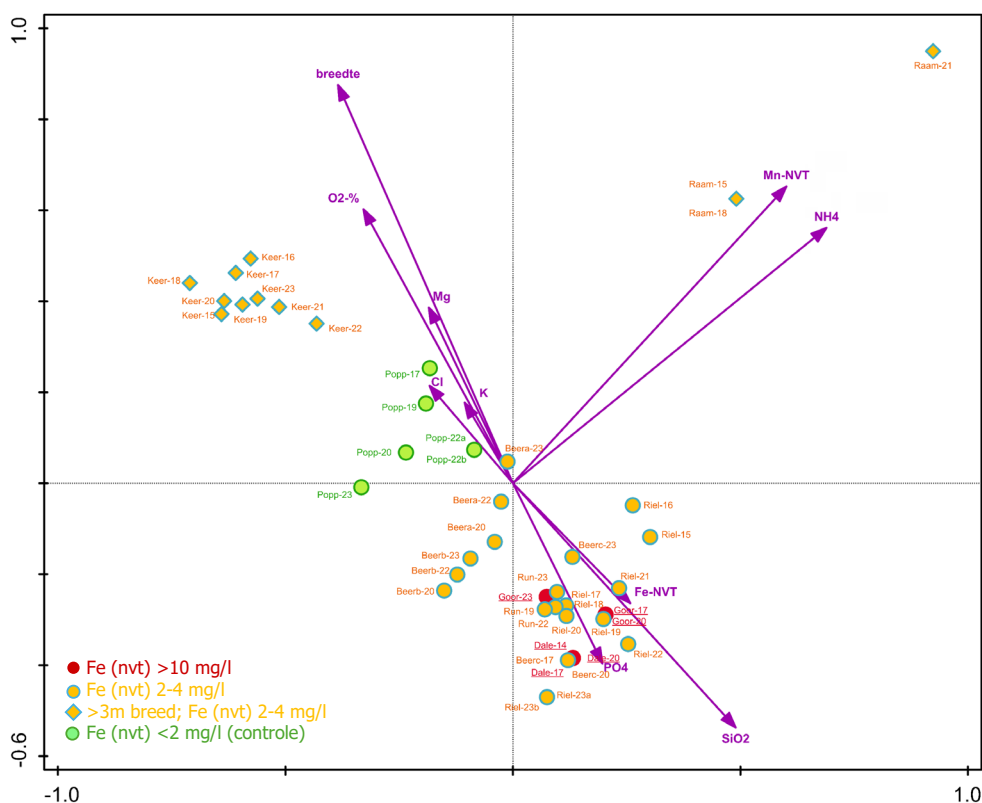
FIGUUR 2.7 ALS FIGUUR 2.6 VOOR INDIVIDUELE MONSTERS MAAR NU MET INDELING IN DRIE CATEGORIEËN OP BASIS VAN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE EN EEN VERDER ONDERSCHIED TUSSEN ACHT SMALLE EN TWEE BREDERE LOCATIES. WAARDEN BETREFFEN DE GEMIDDELDEN PLUS DE STANDAARD AFWIJING



Om deze verschillen in de EKR-waarde en de achterliggende deelmaatlatten beter te kunnen duiden zijn dezelfde gegevens ook multivariaat beoordeeld. Zoals hierboven al verondersteld bevestigt de multivariate-analyse dat de breedte van de watergang (en de daaraan gekoppelde stuurfactoren, zie voetnoot 21 op pagina 19) de belangrijkste factor voor de verschillen in de macrofaunagemeenschappen is (Figuur 2.8; parameters zijn geselecteerd middels voorwaartse selectie). Zowel de monsters uit de Raamsloop (breedte 6m; rechtsboven in figuur)

als de Keersop (breedte 7m; linksboven in figuur) nemen een geheel aparte plaats in het diagram in. Dit geldt ook voor de monsters uit de controlelocatie in de Poppelsche Leij. Ook dit kan door de breedte beïnvloed zijn, aangezien de Poppelsche Leij een breedte van 3 m heeft en daarmee smaller is dan de Keersop en Raamsloop maar iets breder dan de andere locaties (1-2,5 m).

FIGUUR 2.8 MULTIVARIATE-ANALYSE VAN DE CASE STUDIE BIJ WATERSCHAP DE DOMMEL. PARAMETERS ZIJN GESELECTEERD MIDDELS VOORWAARTSE SELECTIE (CCA). VERKLAARDE VARIANTIE: 25,6%

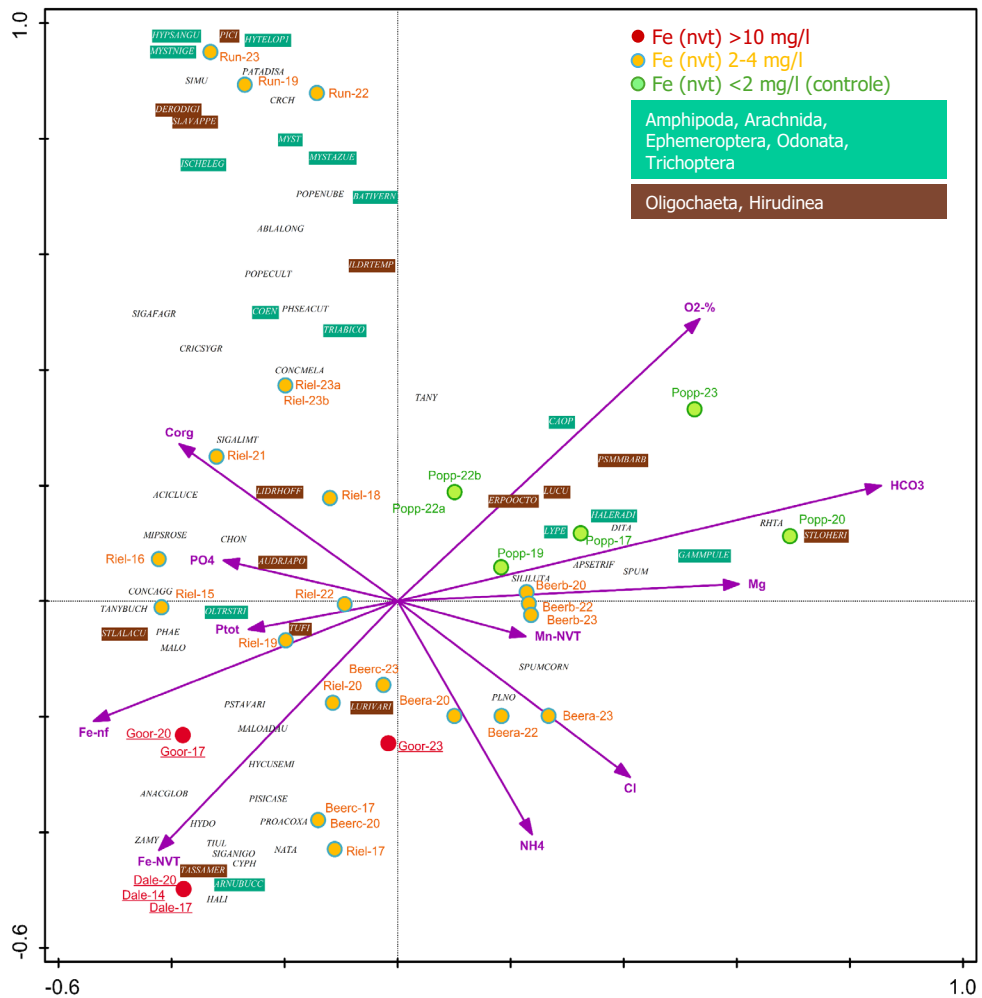


Om meer inzicht in de groep van smalle locaties te krijgen is de multivariate-analyse herhaald, maar nu met weglating van de twee bredere waterlopen Raamsloop en Keersop (Figuur 2.9). Ook bij deze analyse blijkt dat de monsters uit de controlelocatie in de Poppelsche Leij een aparte plaats in het diagram krijgen (rechtsboven vlak), waarbij de scheiding langs de x-as koppelt aan hogere hardheid (HCO_3 , Mg) en zuurstof percentages. Zo is de gemiddelde HCO_3 en Mg concentratie in de Poppelsche Leij 73,4 respectievelijk 9,3 mg/l en bedragen deze waarden in de Rielloop en Run gemiddeld 29,2 en 3,8 mg/l. Ook de Goorloop (16,0 mg/l) en vooral het Dalemstroompje (8,4 mg/l) hebben een lage HCO_3 -concentratie, terwijl deze parameter voor de Kleine Beerze varieert van 28 mg/l in locatie 251081 (in figuur 2.9 aangeduid als Beerc), 67 mg/l in 250084 (in figuur 2.9 aangeduid als Beera) en 81 mg/l in 251080 (in figuur 2.9 aangeduid als Beerb). De verdeling over de y-as wordt enerzijds gestuurd door zuurstof²² en anderzijds door de totaal ijzerconcentratie.

22 In de Run en de Poppelsche Leij variëren de jaargemiddelden tussen de 78 en 90%, terwijl dat bij de andere locaties om waarden tussen de 48 en 79% gaat.

FIGUUR 2.9

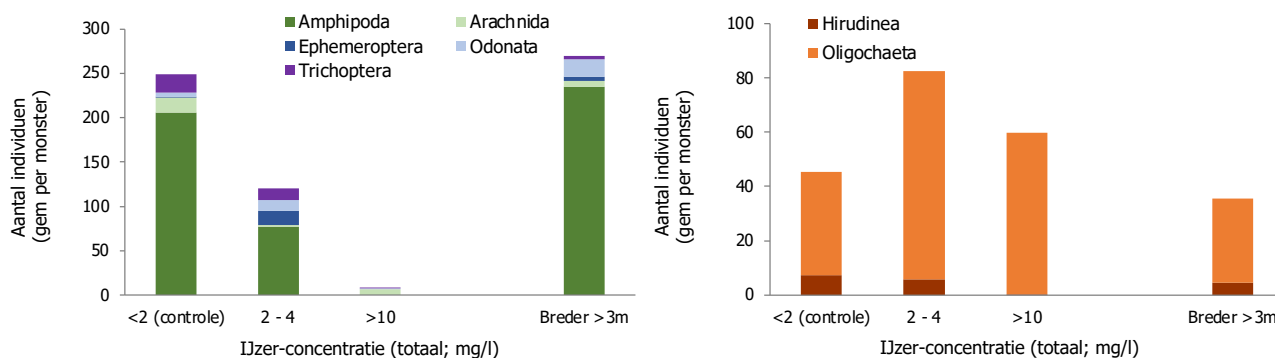
MULTIVARIATE CCA-ANALYSE VAN DE CASE STUDIE BIJ WATERSCHAP DE DOMMEL ZONDER DE TWEE WATERLOPEN MET EEN BREEDTE >3M (KEERSOP EN RAAMSLOOP). PARAMETERS ZIJN GESELECTEERD MIDDELS VOORWAARTSE SELECTIE. VERKLAARDE VARIANTIE: 23,3%



Ten slotte blijkt uit figuur 2.9, dat onderscheidende soorten, die tot de groepen van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers behoren (weergegeven op een groene achtergrond), vaker boven dan onder de x-as zijn gelegen. Dit geldt overigens ook voor de bloedzuigers en oligochaete wormen (weergegeven op een bruine achtergrond). Daarom zijn deze verschillen in de macrofaunagemeenschap nader beoordeeld (Figuur 2.10). De dichtheid van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers blijkt sterk te dalen naarmate de totaal ijzerconcentratie hoger is. Dit geldt vooral voor het Dalemstroompje en Goorloop (totaal ijzerconcentratie >10 mg/l), maar ook bij de tussenliggende groep locaties (2–4 mg/l; Kleine Beerze, Rielloop en Run) zijn de aantallen individuen beduidend lager dan in de Poppelsche Leij (controle). Hierbij moet men zich realiseren, dat binnen deze tussenliggende groep de variatie in macrofaunagemeenschap groot is (figuur 2.9) en dat dit onder meer met verschillen in hardheid, zuurstof en totaal ijzerconcentraties correleert. Daarom is deze vergelijking van het aantal individuen vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers ook uitgevoerd op basis van alleen de locaties 250049 (Rielloop) en 251081 (Kleine Beerze-c), aangezien die in figuur 2.9 het dichtst in de buurt van het Dalemstroompje en de Goorloop zijn gelegen. In deze twee locaties (250049 en 251081) zijn er gemiddeld per monster 84 individuen aan vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers aanwezig, terwijl dat er voor het Dalemstroompje en de Goorloop gemiddeld slechts acht zijn.

FIGUUR 2.10

GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER VOOR ENKELE POSITIEF INDICERENDE TAXA-GROEPEN (LINKS) EN TWEE NEGATIEF INDICERENDE TAXA-GROEPEN. DE FIGUUR IS GEBASEERD OP 46 MACROFAUNA-MONSTERS, AFKOMSTIG VAN DE 10 LOCATIES, DIE IN VIER GROEPEN ZIJN INGEDEELD



Deze constatering is goed vergelijkbaar met de bevindingen uit de case studie voor Waterschap Zuiderzeeland (figuur 2.4), maar er zijn twee opvallende verschillen namelijk:

1. in de aantallen oligochaete wormen en bloedzuigers

Bij oplopende totaal ijzerconcentraties nam het aantal individuen bij Waterschap Zuiderzeeland sterk toe, terwijl daar bij deze case studie van Waterschap De Dommel geen sprake van is.

2. EKR-waarden

Bij Waterschap Zuiderzeeland was de EKR-waarde van alle monsters met een totaal ijzerconcentratie >4,5 mg/l lager dan 0,2. Voor de twee locaties met een totaal ijzerconcentratie >10 mg/l in de case studie bij Waterschap De Dommel varieert de EKR-waarde tussen de 0,33 en 0,51 (gem 0,41 over zes monsters).

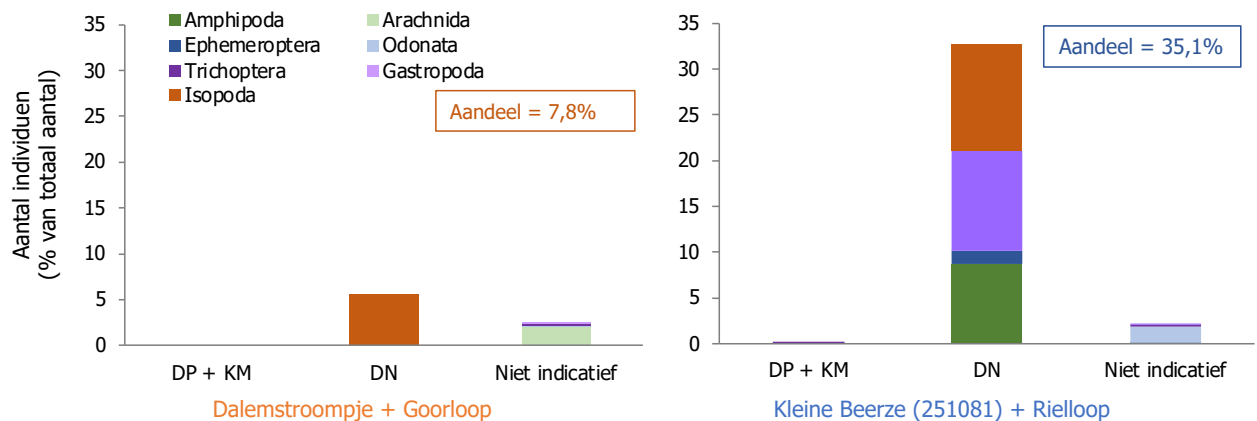
Dit verschil in EKR-waarde lijkt (deels) te zijn veroorzaakt door de rekenkundige werking van de maatlat. Zo kan theoretisch een locatie, waarin alle macrofauna afwezig is op één individu van een kenmerkende soort na, toch een hoge EKR-waarde krijgen. Dit is natuurlijk een extreem voorbeeld maar het achterliggende principe lijkt ook een verklaring voor de nog redelijk hoge EKR-waarden in deze case studie bij Waterschap De Dommel. Dit is in figuur 2.11 geïllustreerd. Uitgangspunt hierbij zijn de vijf hierboven genoemde soortgroepen, waarvan de dichtheden bij de hoogste totaal ijzerconcentratie vrijwel 0 zijn (Figuur 2.10). In de zes macrofauna-monsters uit het Dalemstroompje en de Goorloop zaten gemiddeld slechts acht individuen aan vlokreeften, watermijten, haften, libellen en/of kokerjuffers. Ook het gemiddeld aantal slakken en pissebedden is met 19 individuen/monster laag te noemen. Het totaal aantal individuen van deze zeven soortgroepen vormt slechts 7,8% van het totaal aantal individuen, terwijl dit aandeel bij locatie 251081 in de Kleine Beerze en 250049 in de Rielloop 35,1% bedraagt. In beide gevallen zijn er geen soorten aangetroffen, die als kenmerkend of dominant positief worden beschouwd. De vrijwel volledige afwezigheid van deze zeven soortgroepen bij totaal ijzerconcentraties >10 mg/l, maakt echter dat niet alleen de dominant positieve en kenmerkende soorten uit deze zeven soortgroepen ontbreken, maar dat dit ook voor veel dominant negatieve soorten geldt (Figuur 2.11). De voor R4 dominant negatieve haft *Cloeon dipterum* wordt bijvoorbeeld wel aangetroffen in de Kleine Beerze en Rielloop, maar niet in de macrofauna-monsters uit het Dalemstroompje en de Goorloop²³. Ditzelfde geldt voor bijvoorbeeld de bij R4 dominant negatieve kokerjuffer *Limnephilus lunatus*,

23 Binnen de vijf soortgroepen vlokreeften, watermijten, haften, libellen en/of kokerjuffers zijn veel soorten voor het watertype R4 als kenmerkend of dominant positief beoordeeld. Dit betreft bijvoorbeeld de vlokreeft *Gammarus pulex*, de watermijt *Arrenurus cylindricus* en de kokerjuffer *Hydropsyche pellucidula*. Binnen deze vijf soortgroepen zijn echter ook verschillende soorten als dominant negatief voor R4 beoordeeld, zoals de haften *Caenis horaria*, *Cloeon simile* en *Cloeon dipterum*.

de slak *Radix balthica* en de libel *Ischnura elegans* alsmede voor de niet indicerende vlokreeft *Crangonyx pseudogracilis* en de pissebed *Proasellus meridianus*. Doordat van de zeven genoemde soortgroepen ook veel dominant negatieve soorten in het Dalemstroompje en de Goorloop ontbreken, wordt (zelfs in het geval dat er geen verschillen zouden zijn) het percentage van dominant positieve en kenmerkende soorten per definitie groter. Voor de twee locaties met een hoog totaal ijzerconcentratie is de abundantie van kenmerkende en dominant positieve soorten gemiddeld 15,7% (Kleine Beerze + Goorloop = 6,5%) en de abundantie van negatief dominante soorten 12,3% (Kleine Beerze + Goorloop = 35,7%).

De lage dichtheid aan (dominant negatieve) vlokreeften, watermijten, haften, libellen, kokerjuffers, slakken en pissebedden op de locaties met een totaal ijzerconcentratie >10 mg/l zorgen hierdoor mede voor rekenkundig opvallend hoge EKR-waarden. Als deze situatie met totaal ijzerconcentraties >10 mg/l voldoende vaak in Nederland voorkomen, wordt geadviseerd om het onderscheidend vermogen en de toepasbaarheid van de huidige maatlat voor deze situaties te evalueren.

FIGUUR 2.11 AANTAL INDIVIDUEN PER SOORTGROEP ALS PERCENTAGE VAN HET TOTAAL AANTAL INDIVIDUEN MET EEN ONDERSCHIED TUSSEN DE TWEE LOCATIES MET EEN TOTAAL IJZERCONCENTRATIE >10 MG/L EN DE TWEE LOCATIES IN DE KLEINE BEERZE EN DE RIELLOOP, DIE VANUIT DE MULTIVARIATE-ANALYSES HET BEST MET ELKAAR OVEREENKOMEN. VERDER ZIJN DE AANDELEN PER SOORTGROEP OPGESPLITST IN DOMINANT POSITIEVE + KENMERKENDE SOORTEN (DP + KM), DOMINANT NEGATIEVE SOORTEN (DN) EN NIET INDICERENDE SOORTEN



KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

Voor deze case studie is dezelfde aanpak gevolgd als beschreven bij Waterschap Zuiderzeeland. In het kort: de berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de EKR-waarde als het totaal aantal soorten en de dichtheid van gevoelige soorten (som van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers). Hierbij is gekeken naar zowel de situatie, waarbij alleen de totaal ijzerconcentratie aan het model is meegegeven als de situatie, waarbij ook de breedte van de watergang als verklarende parameter is toegevoegd. De uitgevoerde (multi)lineaire kwantielregressies zijn gebaseerd op alle 46 monsters (programma XLSTAT). De resultaten (Figuur 2.12) laten zien dat de EKR-waarde geen verband met de totaal ijzerconcentratie vertoont als alleen de totaal ijzerconcentratie aan het model is meegegeven²⁴, terwijl dit wel het geval is bij de situatie waar ook naar de breedte van de watergang is gekeken. Voor het aantal soorten laten beide opties (alleen Fe of ook de breedte) een slechte fit zien en zijn zeker de resultaten bij het twee parameter model (Fe en breedte) onlogisch en onbetrouwbaar. Overeenkomstig met de case studie bij Waterschap Zuiderzeeland blijkt

24 Dit blijkt ondermeer uit het feit, dat de grijze horizontale lijn van het gemiddelde binnen het (zeer ruime) 95%-betrouwbaarheidsinterval ligt.

ook voor Waterschap De Dommel dat de dichtheid van gevoelige soorten het sterkst op toenemende totaal ijzerconcentraties reageert.

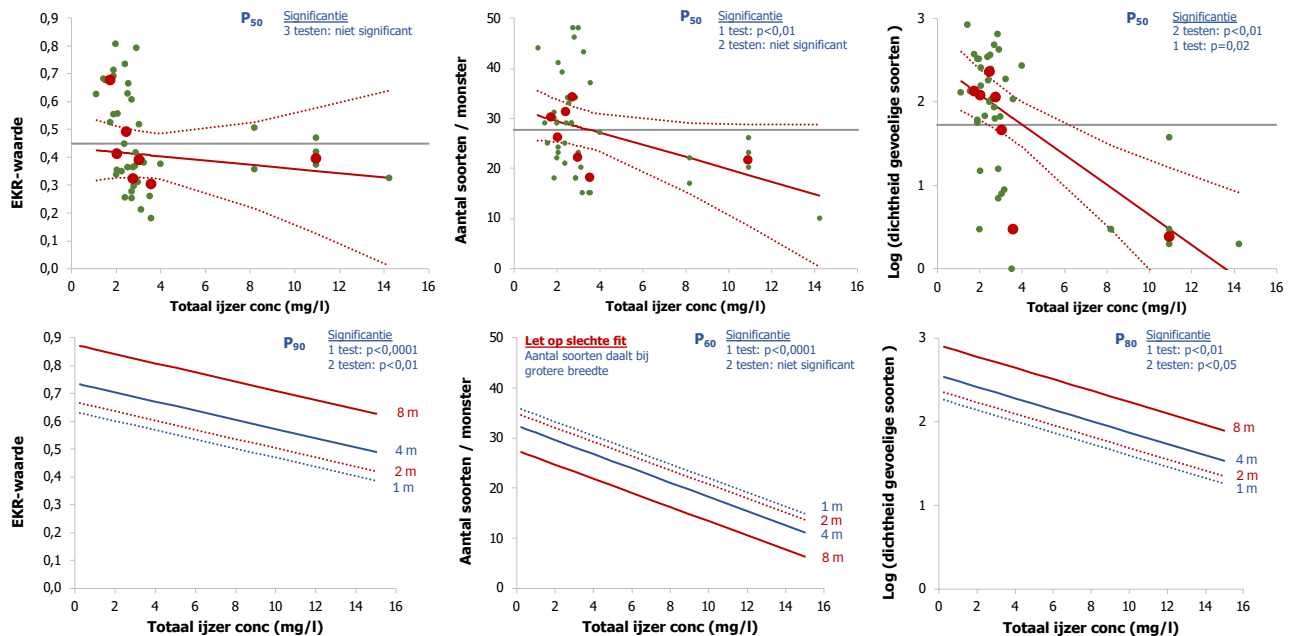
Wel moet worden opgemerkt, dat de lage dichtheden van deze soorten bij het Dalemstroompje en de Goorloop een sterke invloed op het model hebben gehad. De berekende effectpercentages zijn in tabel 2.4 opgenomen. Bij deze kwantificering dient men eveneens in ogenschouw te houden dat

1. de afwijkend hoge EKR-waarden in Dalemstroompje en de Goorloop een grote rol bij de berekende effecten speelden. Zoals hierboven besproken lijkt dit verband te houden met de rekenkundige opbouw van de EKR in combinatie met het feit dat zelfs de dominant negatieve soorten binnen de vlokreeften watermijten, haften, libellen en kokerjuffers op deze twee locaties vrijwel zijn verdwenen (Figuur 2.11).
2. bij alle berekeningen een rol speelt, dat de spreiding over de totaal ijzerconcentraties niet optimaal is. Zo is de variatie voor acht van de tien locaties (excl. Dalemstroompje en Goorloop) beperkt tot maximaal een factor 2. Het (waar mogelijk) uitbreiden van de dataset met locaties met een totaal ijzerconcentratie tussen de 3 en 8 mg/l zou de betrouwbaarheid vergroten.

FIGUUR 2.12 KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), TOTAAL AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN HET LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS).

BOVENSTE FIGUREN: GROENE PUNTEN GEVEN DE MEETWAARDEN. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEE GESTIPPELDE RODE LIJNEN HET 95% BETROUWBAARHEIDINTERVAL. DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET. DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS (DE WORTEL VAN 46 IS 6,8).

ONDERSTE FIGUREN: DE BEREKENDE LINEAIRE REGRESSIELIJN IS GEÏLLUSTREERD VOOR WATERGANGEN MET EEN BREEDTE VAN 1, 2, 4 EN 8 METER. DE GEBRUIKTE PERCENTIEL-WAARDEN ZIJN TELKENS AANGEDUID IN DE RECHTER BOVENHOEK



TABEL 2.4 OVERZICHT VAN DE VOOR WATERSCHAP DE DOMMEL BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC₂₀ EN EC₅₀-WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, HET AANTAL SOORTEN EN DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	Model	P _{xx} waarde	EC ₂₀ (mg/l Fe _{tot})	EC ₅₀ (mg/l Fe _{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	Fe	P ₅₀	-	-	-
	Fe + breedte	P ₉₀	7,9	>10	0,017 EKR-waarde
Aantal soorten	Fe	P ₅₀	5,3	>10	1,2 soorten
	Fe + breedte	P ₆₀	-	-	-
Dichtheid gevoelige soorten ¹⁾	Fe	P ₅₀	0,50	1,66	34 individuen
	Fe + breedte	P ₈₀	1,6	4,7	12 individuen

-: Model heeft geen goede fit.

¹⁾ Het model (figuur 2.12) is gefit op het logaritme van het aantal individuen. Voor deze effect percentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

2.4 HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER

Balangrijkste bevindingen:

- Bij hogere totaal ijzerconcentraties zijn de EKR-waarden gemiddeld genomen lager. Zo komen EKR-waarden boven de 0,4 niet langer voor als de totaal ijzerconcentraties groter dan 4 mg/l zijn. Daarnaast worden situaties met een totaal ijzerconcentratie >6 mg/l door zowel een lager aantal soorten als een lagere dichtheid van gevoelige soortgroepen (vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers) gekenmerkt.
- Ook bij totaal ijzerconcentraties tussen de 1,5 en 3,0 mg/l lijken er al veranderingen in de macrofaunagemeenschap op te treden. Dit is vooral te zien in een toegenomen dichtheid van oligochaete wormen. In een multivariate-analyse wordt dit geïllustreerd, doordat de meeste van deze monsters zijn gepositioneerd tussen monsters met een totaal ijzerconcentratie >6 mg/l en monsters met een totaal ijzerconcentratie <1,5 mg/l. Dit effect is echter niet in alle monsters zichtbaar. Variatie in de breedte van de watergang respectievelijk bedekking van submerse en/of grote drijfbladplanten lijkt hier een rol in te spelen.

BESCHIKBARE DATASET

Het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier heeft vijf duinrellen en 15 duinsloten geselecteerd (Tabel 2.5). De locatie gemiddelde totaal ijzerconcentraties variëren tussen de 0,27 en 13,5 mg/l. Ook binnen een locatie kan de variatie groot zijn. Zo variëren de jaar-gemiddelde concentraties bij locatie 275406 tussen de 1,7 en 3,3 mg/l, bij locatie 490202 tussen de 0,7 en 2,5 mg/l en bij BDV004 tussen de 6,0 en 26,6 mg/l. De oorzaken van deze variatie zijn niet verder onderzocht maar voor een ondiepe locatie als BDV004 is het voorstelbaar dat kleine variaties in het debiet al snel een groot effect op de bezinkende ijzervlokken kunnen hebben. De totaal ijzerconcentraties en macrofauna inventarisaties zijn telkens afkomstig van hetzelfde meetpunt, maar het aantal jaren waarin de macrofauna werd gemonitord is veelal groter dan het aantal jaren waarin de ijzerconcentraties zijn bepaald. Gelet op de relatief grote jaarlijkse variatie is gekozen om de data-analyse te baseren op telkens drie meetjaren uit de periode 2009 – 2016, waarin zowel de macrofauna als de totaal ijzerconcentraties zijn onderzocht. Hiermee zijn er in totaal 60 macrofauna-monsters in de data-analyse opgenomen. In latere jaren is de totaal ijzerconcentratie niet langer vastgesteld. In enkele gevallen ontbrak een derde macrofauna-monster uit de periode 2009-2016 en is het eerst volgende macrofauna-monster (vaak 2018) gekoppeld aan de laatst gemeten totaal ijzerconcentratie.

Ook voor andere parameters is er een grote variatie tussen de 20 locaties. Zo varieert de gemiddelde chloride concentratie tussen de 50 en 9200 mg/l, bicarbonaat tussen 29 en 472 mg/l en calcium tussen 11 en 268 mg/l. Ook de watertypen laten verschillen zien met 12 sloten (M1, waarvan twee M1b), vijf stromende wateren (R3 en één R4) alsmede één regionaal kanaal M3 en twee brakke wateren (M31). Deze laatste twee locaties (BDV001 en BDV022) zijn in data-analyses meegenomen op basis van de EKR-waarde, maar niet in de multivariate-analyses van de soortsaamenstelling. De levensgemeenschap in deze brakke wateren wijkt zodanig af van de andere 18 locaties, dat de parameter chloride een dominant effect heeft en het onderscheidend vermogen binnen de andere 18 locaties klein wordt.

TABEL 2.5 OVERZICHT VAN DE 20 LOCATIES INCLUSIEF ENKELE KARAKTERISTIEKEN

Type	Locatie	Watertype	IJzer conc (totaal; mg/l)		Chloride (mg/l)	Gemiddelde breedte (m)
			Gemiddelde	Min - Max		
Duinrel	BDV007	M1a	0,27	0,10 – 1,3	63	2,0
	BDV013	R3	2,9	0,44 – 23,0	53	0,65
	277927	R3	7,1	0,42 – 59,0	60	0,70
	BDV003	M1a	11,0	4,1 – 16,0	148	1,7
	BDV004	R3	13,5	1,4 – 120,0	58	0,68
Duinsloot	BDV001	M31	0,35	0,10 – 0,73	9261	2,1
	BDV022	M31	0,66	0,25 – 2,8	5092	2,8
	275502	M1b	0,66	0,10 – 2,7	229	2,6
	204010	R4	0,69	0,16 – 4,5	50	1,5
	801004	M1b	1,0	0,49 – 2,3	412	3,1
	415002	M1a	1,1	0,16 – 2,7	168	7,8
	BDV012	M1a	1,2	0,30 – 2,6	100	5,5
	201001	M3	1,4	0,44 – 5,2	168	3,5
	490202	R3	1,7	0,16 – 14,0	78	0,72
	206012	M1a	1,8	0,29 – 15,0	134	1,5
	408003	M1a	2,1	0,77 – 6,1	152	2,6
	408002	M1a	2,5	0,19 – 12,0	76	4,3
	275406	M1a	2,5	0,37 – 9,6	72	2,0
	203006	M1a	2,7	1,2 – 4,7	100	3,6
	407002	M1a	3,0	0,79 – 9,9	70	1,8

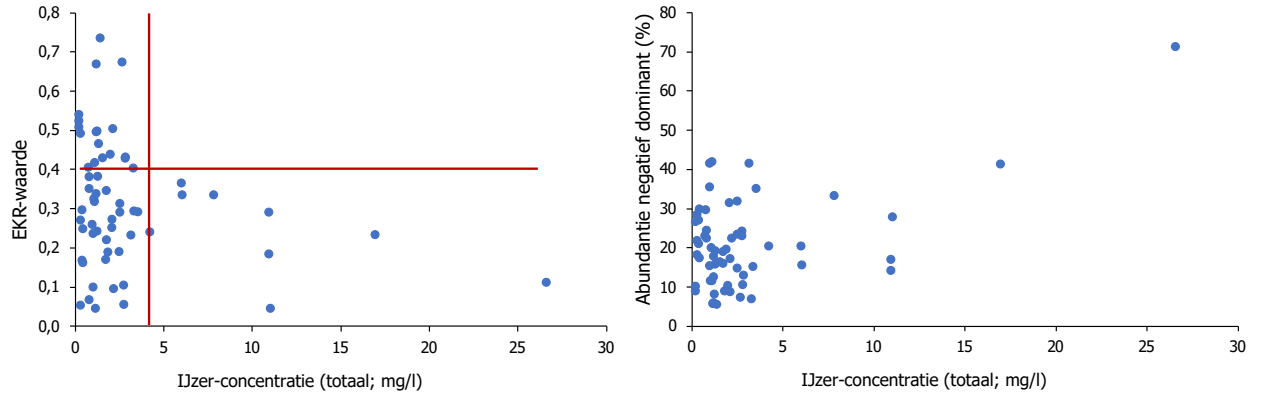
KWALITATIEVE KARAKTERISERING

Net zoals in beide bovenstaande case studies is als eerste gekeken naar de univariate relatie tussen de totaal ijzerconcentratie en de EKR-waarde (Figuur 2.13). In dit figuur zijn ook de gegevens voor de deelmaatlat abundantie van dominant negatieve soorten opgenomen. Door de variatie in watertypen (M1/M3 versus R3, R4 en M31) is deze deelmaatlat de enige, die voor alle 60 macrofauna-monsters beschikbaar is.

Overeenkomstig met de datasets van de waterschappen Zuiderzeeland en De Dommel (Figuren 2.1 en 2.6) laat ook de huidige dataset van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier zien, dat bij hogere totaal ijzerconcentraties de EKR-waarden gemiddeld genomen lager zijn. Dit wordt vooral geïllustreerd doordat EKR-waarden >0,4 niet langer vóórkomen als de totaal ijzerconcentraties groter dan 4 mg/l zijn (zie de rode lijnen in figuur 2.13). Het aantal monsters met zo'n totaal ijzerconcentratie >4 mg/l is weliswaar beperkt, maar deze visuele grenswaarde van 4 mg/l bij het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier komt op ordegruotte goed overeen met vergelijkbare grenswaarden voor

de totaal ijzerconcentratie bij Waterschap Zuiderzeeland (als Fe >4,5 mg/l dan EKR <0,2) en Waterschap De Dommel (als Fe >3 mg/l dan EKR <0,5).

FIGUUR 2.13 RELATIE TUSSEN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE (X-AS; mg/l) EN RESPECTIEVELIJK DE EKR-WAARDE (LINKS) EN DE ACHTERLIGGENDE DEELMAATLAT ABUNDANTIE VAN DOMINANT NEGATIEVE SOORTEN (DN%) VOOR ALLE 60 INDIVIDUELE MACROFAUNA-MONSTERS. DE RODE LIJNEN ZIJN INDICATIEVE ILLUSTRATIES VAN VERSCHILLEN



Gelet op de grote variatie in de EKR-waarde bij totaal ijzerconcentraties <4 mg/l zijn er echter ook nog andere factoren met (wellicht) een groter effect op de EKR-waarde. Dit is beoordeeld middels een multivariate-analyse (CCA en voorwaartse selectie van parameters; Figuur 2.14). Als eerste valt hierbij op, dat de ligging van de locaties over de diagonaal van linksonder naar rechtsboven een goede relatie met de totaal ijzerconcentratie vertoont. Monsters met een totaal ijzerconcentratie >6 mg/l liggen (vrijwel) allemaal in de rechter bovenhoek, terwijl alle locaties met een totaal ijzerconcentratie <1 mg/l juist in de linksonder hoek liggen. Ook voor de tussenliggende categorie (1,5 < Fe < 3,0 mg/l) liggen de meeste monsters tussen de controle monsters (Fe < 1 mg/l) en de monsters met een totaal ijzer conc > 6 mg/l in.

Alleen de monsters met een licht verhoogde totaal ijzerconcentratie (1-1,5 mg/l) liggen links onder de controlelocaties en nemen daarmee een meer opvallende positie in. Dit lijkt deels met de aanwezigheid van waterplanten verband te houden. Zo is er bij de twee zoete duinsloten met een totaal ijzerconcentratie <1 mg/l (275502 en 204010) nauwelijks sprake van bedekking met submerse en/of grote drijfblad planten (gesommeerde bedekking van 2 of 5%; voornamelijk submers). Ter vergelijking: bij de drie zoete duinsloten met een licht hogere totaal ijzerconcentratie (1-1,5 mg/l; BDV012, 415002 en 201001; linksonder in het figuur) varieert de locatie gemiddelde bedekking van submerse en grote drijfblad planten tussen de 5% en 50%²⁵. In de laatste duinsloot met een totaal ijzerconcentratie van 1-1,5 mg/l (801004) zijn in geen van de drie jaren submerse noch grote drijfblad planten aangetroffen en in het multivariate diagram zijn deze drie monsters in de richting van de (soortenarmere) rechter bovenhoek opgeschoven. Iets vergelijkbaars geldt ook voor de locaties met een totaal ijzerconcentratie van 1,5 – 3,0 mg/l. Voor deze locaties binnen de (soortenrijkere) linker onderhoek (203006, 275406, 407002 en 408002) geldt dat de locatiegemiddelde, gesommeerde bedekking met submerse en grote drijfbladplanten tussen de 47 en 85% varieert, terwijl bij de soortenarmere locaties (206012, 408003, 490202 en BDV013) deze bedekking tussen de 0 en 30% varieert.

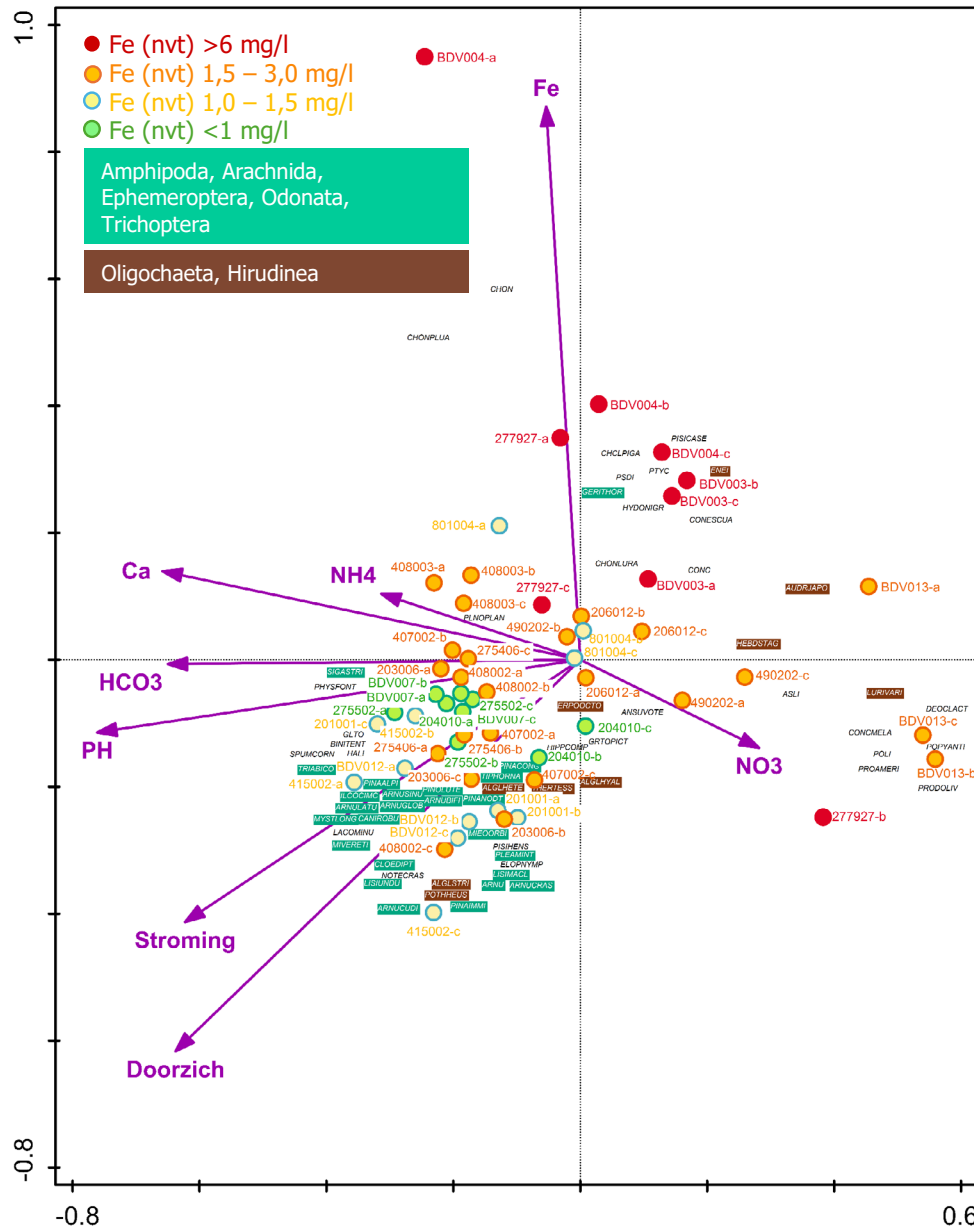
Uit figuur 2.14 blijkt verder dat locaties in de linker onderhoek vooral door hoge dichtheden van verschillende watermijten worden gekenmerkt, zoals *Arrenurus bifidicodulus*, *A. crassicaudatus*, *A. globator*, *A. latus*, *Limnesia undulata* en *Piona imminuta*. Dit is terug te zien in

²⁵ De breedte van de watergang vertoont een positieve correlatie met de aanwezigheid van waterplanten.

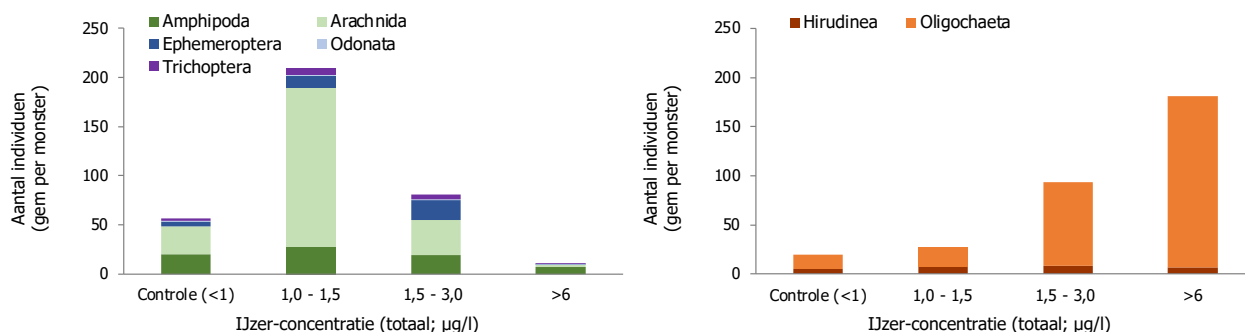
de opvallend hoge dichtheden van watermijten (*Arachnida*) bij de licht verhoogde locaties ($1 < \text{Fe} < 1,5 \text{ mg/l}$; Figuur 2.15). Deze figuur illustreert eveneens dat locaties met een totaal ijzerconcentratie $> 6 \text{ mg/l}$ worden gekenmerkt door zeer lage dichtheden en/of het ontbreken van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers, terwijl de dichtheden van oligochaete wormen juist opvallend hoog zijn.

FIGUUR 2.14

MULTIVARIATE CCA-ANALYSE VAN DE CASE STUDIE BIJ HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER. PARAMETERS ZIJN GESELECTEERD MIDDELS VOORWAARTSE SELECTIE. VERKLAARDE VARIANTIE: 17,4%



FIGUUR 2.15 GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER VOOR DE GEVOELIGE SOORTGROEPEN (LINKS) EN BLOEDZUIGERS EN OLIGOCHAETE WORMEN (RECHTS). DE FIGUUR IS GEBASEERD OP 54 MACROFAUNA-MONSTERS, AFKOMSTIG VAN DE 18 LOCATIES, DIE IN VIER GROEPEN ZIJN INGEDEELD OP BASIS VAN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE



KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

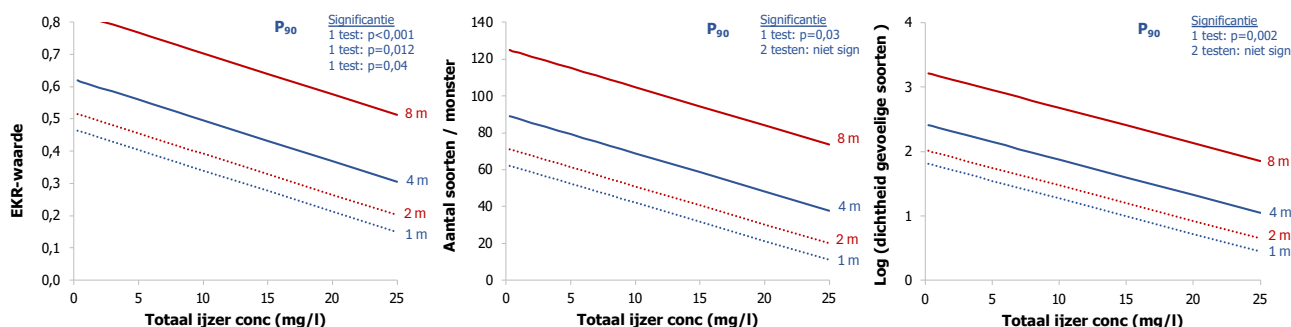
Ook voor deze case studie zijn (multi)lineaire kwantielregressies uitgevoerd om het effect van verhoogde totaal ijzerconcentraties in beeld te brengen. Deze berekeningen zijn wederom twee keer uitgevoerd, namelijk met alleen de totaal ijzerconcentratie als verklarende variabele en een tweede keer waarbij ook de breedte van de watergang aan het model is meegegeven. Gelet op de grote variatie in de EKR-waarde bij totaal ijzerconcentraties <4 mg/l én het kleine aantal monsters met een totaal ijzerconcentratie >4 mg/l (Figuur 2.13), is het niet onverwacht dat de kwantielregressies met alleen de totaal ijzerconcentratie voor geen van de drie parameters (EKR, aantal soorten en dichtheid van gevoelige soorten) een duidelijke relatie kon berekenen²⁶. Deze berekende relaties verbeteren als de kwantielregressie met zowel de totaal ijzerconcentratie als de breedte van de watergang worden uitgevoerd (Figuur 2.16).

Dat de breedte van de watergang tot eenduidiger relaties leidt dan de totaal ijzerconcentratie²⁷, komt onder andere doordat de breedte van de watergang een vrij homogene verdeling over de locaties vertoont (zo zijn er vier locaties met een breedte <1m; zes met een breedte tussen de 1-2 m; vijf tussen de 2-3m en vier tussen de 3-5m). Totaal ijzerconcentraties boven de 4 mg/l zijn daarentegen in slechts negen van de 60 monsters aangetroffen. Daarnaast is het effect van de breedte goed te verklaren. Zo lijkt de kans op drijvende en ondergedoken waterplanten bij bredere watergangen groter en ook zonder waterplanten kan het aantal habitats voor macrofauna groter zijn dan in een smallere watergang. Daarnaast zijn de totaal ijzerconcentraties en de breedte van de watergang enigszins aan elkaar gecorreleerd. Locaties met een totaal ijzerconcentratie >5 mg/l zijn ten slotte allemaal vrij smalle watergangen (0,7–1,7m). Dit beperkt het onderscheidend vermogen bij toevoeging van de totaal ijzerconcentratie als tweede verklarende parameter. De berekende effectpercentages zijn in tabel 2.6 opgenomen, maar gelet op bovenstaande interactie tussen de totaal ijzerconcentratie en de breedte van de watergang dienen ze slechts als indicatieve waarden beschouwd te worden.

²⁶ Deze relaties zijn daarom niet opgenomen in figuur 2.16.

²⁷ Ook hier geldt de al bij §2.3 gemaakte opmerking dat de breedte geen stuurfactor maar een locatiekenmerk is en dat de breedte van een watergang aan allerlei stuurfactoren kan correleren, zoals het aantal beschikbare habitats, de stroomsnelheid of mate van beschaduwning. Welke hiervan de bepalende stuurfactoren zijn vraagt om een andere analyse.

FIGUUR 2.16 KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS). HET EFFECT VAN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE IS OP DE X-AS WEERGEGEVEN EN HET EFFECT VAN DE BREEDTE VAN DE WATERGANG IS VIA DE VIER VERSCHILLENDE LIJNEN GEÏLLUSTREERD



TABEL 2.6 OVERZICHT VAN DE VOOR HET HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC_{20} EN EC_{50} -WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, AANTAL SOORTEN EN DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	P_{xx} waarde	EC_{20} (mg/l Fe_{tot})	EC_{50} (mg/l Fe_{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	P_{90}	7,0	18	0,013 EKR-waarde
Aantal soorten	P_{90}	6,3	15	2,1 soorten
Dichtheid gevoelige soorten ¹⁾	P_{90}	2,0	5,7	10 - 90 individuen ²⁾

¹⁾ Het model (figuur 2.16) is gefit op het logaritme van het aantal individuen. Voor deze effect percentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 0 – 15 mg/l totaal ijzer.

²⁾ Bij bredere watergangen is de dichtheid hoger en de afname kwantitatief daarmee ook groter.

2.5 WATERSCHAP HUNZE EN AA'S

Balangrijkste bevindingen:

- De stroomsnelheid, die in de Drentsche Aa veelal groter is dan in de Hunze en Westerwoldse Aa, heeft een sturende invloed op de macrofaunagemeenschap. Zo zijn de EKR-waarden beduidend hoger bij locaties met een stroomsnelheid >10 cm/sec.
- De heterogene verdeling van macrofauna monsters over de range aan totaal ijzerconcentraties én de correlatie tussen totaal ijzerconcentraties en stroming maken de effecten van totaal ijzerconcentraties moeilijker te duiden. Met name de multivariate analyse laat echter zien dat de macrofaunagemeenschap niet alleen op de stroomsnelheid maar ook op hogere totaal ijzerconcentraties reageert. Deze analyse liet verder zien, dat de bij eerdere case studies gehanteerde indeling in 'gevoelige soortgroepen' (bestaande uit alle vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers) in feite een heterogene groep is, waarbij de gevoeligheid voor totaal ijzer per soort verschilt. Binnen deze groep van vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers nemen het aantal soorten en dichtheid van kenmerkende en dominant positieve soorten bijvoorbeeld af bij toenemende totaal ijzerconcentraties, terwijl voor de dominant negatieve en niet-indicerende taxa juist toenames in aantal soorten en dichtheden worden vastgesteld.

BESCHIKBARE DATASET

Waterschap Hunze en Aa's heeft 14 locaties geselecteerd (Tabel 2.7). Vijf locaties liggen in het stroomgebied van de Hunze, zes in die van de Drentsche Aa en drie in die van de Westerwoldse Aa. In alle gevallen gaat het om wateren met watertype R5. De chemische analyses zijn telkens afkomstig uit een nabijgelegen, zo goed mogelijk vergelijkbare locatie. De betrouwbaarheid van de in tabel 2.7 opgegeven totaal ijzerconcentratie varieert echter

tussen de locaties. Zo zijn er zes locaties, waarvoor de totaal ijzerconcentraties alleen in 2024 zijn geanalyseerd en het gemiddelde daarmee op een nog niet complete meetreeks is gebaseerd²⁸. Voor vier van de andere acht locaties waren de totaal ijzerconcentraties voor alle meetjaren aanwezig, terwijl er voor de resterende vier locaties telkens één meetjaar miste. In dit laatste geval is gebruik gemaakt van de totaal ijzerconcentratie uit een naastliggend jaar. Vanwege deze variabele nauwkeurigheid in de locatie gemiddelde totaal ijzerconcentratie zijn de 14 locaties in vijf categorieën met oplopende ijzerconcentraties ingedeeld (Tabel 2.7). Voor sommige locaties waren er vanaf 1984 macrofauna gegevens beschikbaar en in andere gevallen waren de tijdreeksen korter. Soms betrof het een jaarlijkse en soms een driejarige monitoring. De data-analyse is uitgevoerd met in totaal 69 macrofauna-monsters afkomstig van de 14 locaties. Voor alle locaties geldt dat de macrofauna gegevens van ten minste de drie laatst gemonitorde jaren afkomstig waren. In totaal zijn 62 van de 69 macrofauna-monsters afkomstig uit de periode 2015-2023. De resterende zeven monsters betroffen alleen de locatie 4101_02 over de periode 2007-2013.

De meeste macrofauna-monsters waren afkomstig uit het voorjaar. In enkele gevallen waren er zowel voor- als najaar monsters beschikbaar, waarmee het totaal aantal gebruikte macrofauna-monsters per locatie varieerde tussen 3, 4 (in één jaar twee monsters) of 6 (Tabel 2.7). Voor locaties 4101-02 en 2101-05 waren er langere meetreeksen met zowel macrofauna als totaal ijzer gegevens beschikbaar, waardoor het aantal gebruikte macrofauna-monsters voor deze locaties 10 respectievelijk 14 bedroeg. Als locaties onderling met elkaar worden vergeleken is dit telkens op locatiegemiddelde gegevens gebaseerd²⁹.

In de eerste twee categorieën zijn vier (2,0 – 2,5 mg Fe/l) respectievelijk vijf (2,5 – 3,0 mg Fe/l) locaties opgenomen, waarbij de locaties uit zowel het stroomgebied van de Hunze als de Drentsche Aa afkomstig zijn en een onderling variërende stroomsnelheid hebben. Voor de twee hogere categorieën (3,5 – 4,0 en 6,0 – 7,0 mg Fe/l) zijn telkens twee locaties beschikbaar, waarbij er niet langer variatie in het stroomgebied maar nog wel in de stroomsnelheid aanwezig is. Voor de hoogste categorie (10-11 mg Fe/l) is slechts één locatie aanwezig. Verder valt op dat de drie locaties met de hoogste totaal ijzerconcentraties alle drie uit het stroomgebied van de Westerwoldse Aa afkomstig zijn.

28 De totaal ijzerconcentratie is 's winters vaak hoger dan in de zomer. Voor de gebruikte totaal ijzerconcentratie is hier zo goed mogelijk voor gecorrigeerd.

29 In de verdere analyse zijn de voor- en najaarsmonsters daarmee telkens aan dezelfde set verklarende parameters gekoppeld. In figuur 2.18 liggen deze monsters dan ook op dezelfde plek in het diagram.

TABEL 2.7 OVERZICHT VAN DE 14 LOCATIES INCLUSIEF ENKELE KARAKTERISTIEKEN

Stroomgebied	Locatie	Groep Fe (mg/l)	IJzer conc (totaal; mg/l)	Aantal gebruikte MaFa-monsters	Gem. diepte (m) ⁴⁾	Gem. stroming (cm/sec)
Hunze	4101-03	2,0 – 2,5	2,2 ¹⁾	4	<1	7,5
Hunze	4101-14	"	2,2 ¹⁾	4	>1	7,0
Drentsche Aa	2101-07	"	2,4	3	>1	12,5
Drentsche Aa	2101-05	"	2,5	14	<1	18,3
Hunze	4101-02 ³⁾	2,5 – 3,0	2,7	10	>1	3,5
Drentsche Aa	2101-24	"	2,8 ¹⁾	3	>1	60,0
Drentsche Aa	2101-25	"	2,8 ¹⁾	3	<1	60,0
Drentsche Aa	2101-23	"	2,9 ²⁾	3	0,5	23,7
Drentsche Aa	2101-01	"	3,0 ²⁾	3	<1	4,0
Hunze	4101-05	3,5 – 4,0	3,5	4	>1	5,0
Hunze	4101-15	"	3,6 ²⁾	6	<1	27,7
Westerwoldse Aa	1106-08	6,0 – 7,0	6,0 ²⁾	6	<1	10,3
Westerwoldse Aa	1106-12	"	6,9 ²⁾	3	>1	1,5
Westerwoldse Aa	1106-14	10 – 11	10,7 ²⁾	3	<1	4,3

¹⁾ Locatie paren, waarbij van dezelfde gekoppelde chemie locatie gebruik wordt gemaakt.

²⁾ Totaal ijzerconcentratie alleen beschikbaar in 2024 en gebaseerd op een incomplete meetreeks.

³⁾ Locatie met afwijkende inrichting (rechte, brede vrijwel stilstaande diepe loop met houten oeverbeschoeiing).

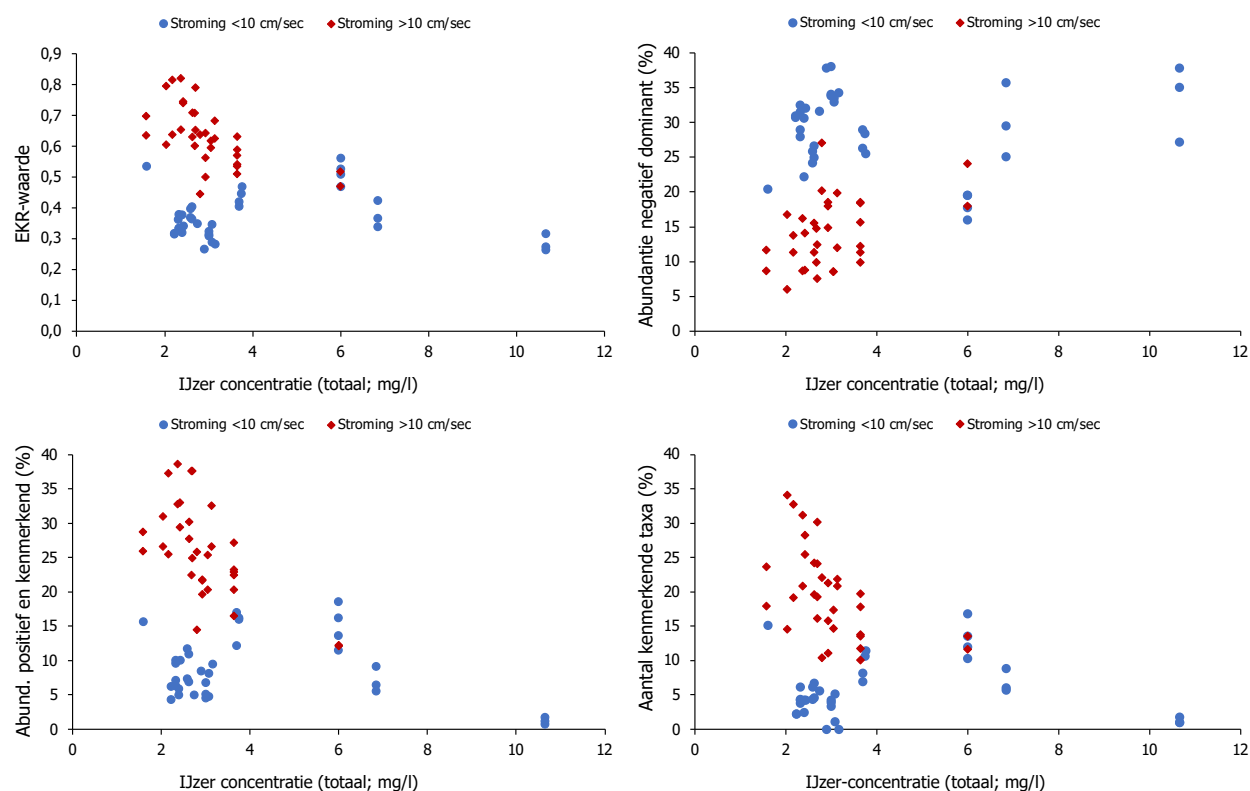
⁴⁾ Diepte varieert zowel in ruimte als in tijd. Diepte van niet doorwaadbare delen is vaak niet accuraat. De diepte is daarom in drie categorieën ingedeeld (0,5; <1; >1m)

KWALITATIEVE KARAKTERISERING

De stroomsnelheid, die in de Drentsche Aa veelal groter is dan in de Hunze en Westerwoldse Aa (tabel 2.7), heeft een sturende invloed op de macrofaunagemeenschap. Zo zijn de EKR-waarden beduidend hoger bij locaties met een stroomsnelheid >10 cm/sec (Figuur 2.17). Dit is gekoppeld aan een lager aandeel van de dominant negatieve soorten en hogere aandelen voor de abundantie van de kenmerkende en dominant positieve taxa alsmede voor het aandeel kenmerkende soorten.

Voor locaties met een stroomsnelheid <10 cm/sec lijken hogere totaal ijzerconcentraties niet of nauwelijks tot een eenduidige verlaging van de EKR-waarde te leiden. Dit geldt ook voor de achterliggende deelmaatlaten. Alleen voor locatie 1106-14 (Westerwoldse Aa) met de hoogste totaal ijzerconcentratie (10,7 mg/l) is de zeer lage abundantie van kenmerkende en positief dominante taxa opvallend te noemen. Ook voor locaties met een stroomsnelheid >10 cm/sec is zo'n verband niet eenduidig aanwezig. Zo is de variatie in EKR-waarden binnen een relatief beperkte range aan totaal ijzerconcentraties (2-4 mg/l) groot en zou een eventuele lineaire regressie sterk door locatie 1106-08 met een totaal ijzerconcentratie van 6 mg/l gestuurd worden.

FIGUUR 2.17 RELATIE TUSSEN DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE (X-AS; $\mu\text{g/l}$) EN RESPECTIEVELIJK DE EKR-WAARDE (LINKSBOVEN) EN DE DRIE ACHTERLIGGENDE DEELMAATLATTEN (DN%; KM+DP% EN KM%) MET ONDERSCHIED TUSSEN LANGZAAM EN SNELLER STROMENDE LOCATIES (< EN >10 CM/SEC). GEGEVENS ZIJN GEBASEERD OP ALLE 69 INDIVIDUELE MACROFAUNA-MONSTERS



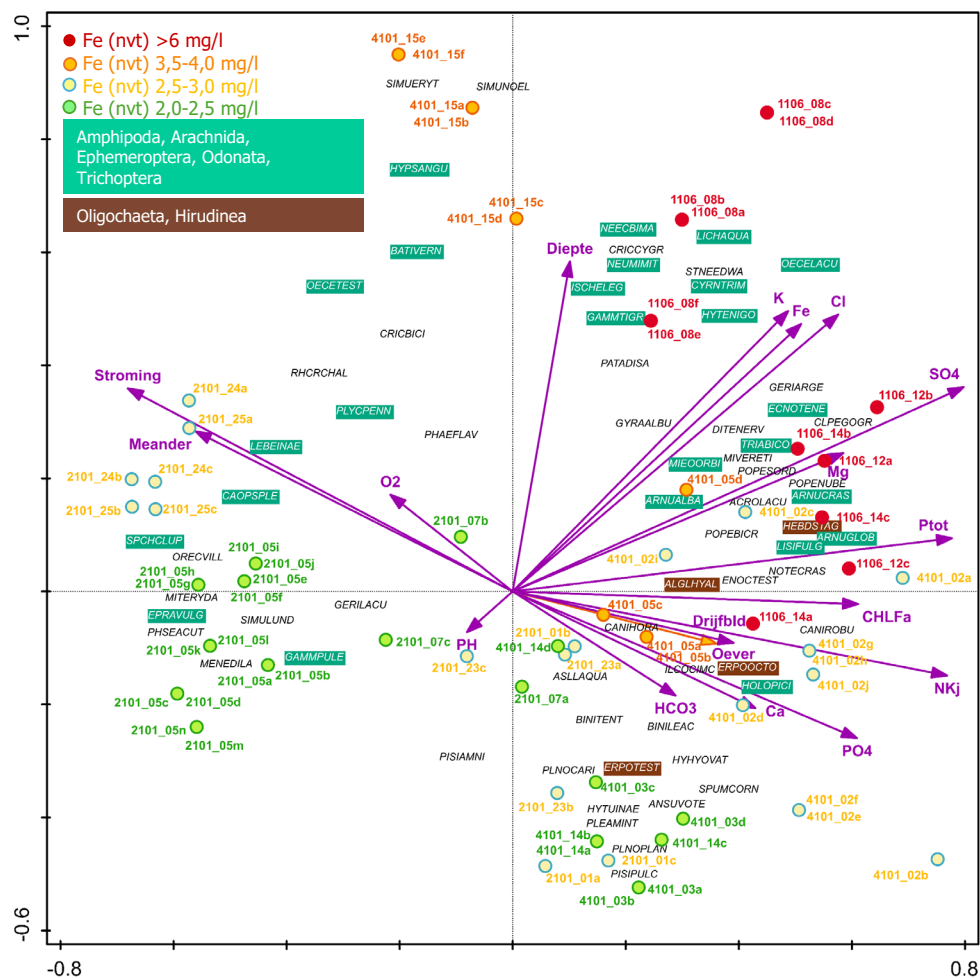
Tegelijkertijd zijn er ook argumenten, die op een effect van de totaal ijzerconcentratie kunnen wijzen. Zo zijn voor locatie 2101-05 in de Drentsche Aa zowel de macrofauna als de totaal ijzerconcentraties jaarlijks over de periode 2017-2023 gemonitord. In vijf van de zeven jaren was de gemiddelde totaal ijzerconcentratie <3 mg/l (1,6 tot 2,7 mg/l), terwijl deze in 2017 en 2021 >3 mg/l (3,0 – 3,1 mg/l) was. Tegelijkertijd was de EKR-waarde in het voorjaar van deze twee meetjaren 0,62-0,63, terwijl die in de andere vijf voorjaren telkens $\geq 0,7$ was. Natuurlijk kan ook dit (mede) door andere factoren zijn veroorzaakt, maar een effect van stroming lijkt minder waarschijnlijk aangezien deze in 2021 juist het hoogst was (gem. 26,7 cm/sec).

Om bovenstaande variatie in de EKR-waarde en de achterliggende deelmaatlaten beter te kunnen duiden zijn dezelfde gegevens ook multivariaat beoordeeld. Zoals verwacht bevestigt de multivariate analyse dat de stroomsnelheid een bepalende invloed op de aquatische levensgemeenschap heeft (CCA met voorwaartse selectie van parameters; Figuur 2.18). Zo liggen, binnen de groep locaties met een totaal ijzerconcentratie tussen de 2 en 2,5 mg/l, alle monsters van de twee locaties met een stroomsnelheid >10 cm/sec (2101-05; 2101-07) aan de linkerkant van de y-as, terwijl de monsters van locaties met een stroomsnelheid <10 cm/sec juist aan de rechtskant liggen (4101-03; 4101-14)³⁰. Ditzelfde is ook terug te zien in de groep locaties met een licht verhoogde totaal ijzerconcentratie (2,5-3,0 mg/l). Zo hebben de locaties 2101-24 en 2101-25 een stroomsnelheid boven de 50 cm/sec en liggen de bijbehorende macrofauna-monsters links van de y-as, terwijl de macrofauna-monsters van de vrijwel stilstaande locatie 4101-02 in de Hunze juist helemaal rechts liggen en van de locatie 2101-23 (24 cm/sec) een intermediaire positie hebben. Verder valt op dat bij de groep locaties met

³⁰ Bij dit kwalitatieve onderscheid tussen locaties met een stroming onder of boven de 10 cm/sec gaat het om een gemiddelde situatie. In droge zomers kan ook de stroomsnelheid van locaties, die als >10 cm/sec zijn gekenmerkt, best <10 cm/sec zijn.

een stroomsnelheid <10 cm/sec (rechterkant van de figuur) en vooral die met een stroming >10 cm/sec (linkerkant van de figuur) de meeste locaties uit de groep met een licht verhoogde totaal ijzerconcentratie hoger liggen (qua positionering langs de y-as) dan de locaties met de laagste totaal ijzerconcentratie. Dit is in overeenstemming met de ligging van de paarse pijl van de totaal ijzerconcentratie, die vrijwel haaks op de pijl van de stroomsnelheid ligt. Dit geleidelijk opschuiven in de richting van de totaal ijzer pijl (rechtsboven in het figuur) is ook terug te zien bij de twee locaties met een totaal ijzerconcentratie tussen de 3,5 en 4,0 mg/l (4101-05 en 4101-15) en het meest eenduidig bij de drie locaties met een totaal ijzerconcentratie >6,0 mg/l. Dit illustreert een situatie, waarbij een toenemende totaal ijzerconcentratie een steeds grotere invloed op de macrofaunagemeenschap heeft³¹.

FIGUUR 2.18 MULTIVARIATE CCA-ANALYSE VAN DE CASE STUDIE BIJ WATERSCHAP HUNZE EN AA'S. PARAMETERS ZIJN GESELECTEERD MIDDELS VOORWAARTSE SELECTIE. WEERGEGEVEN TAXA ZIJN BEPERKT TOT DE MEEST ONDERSCHIEDENDE. VERKLAARDE VARIANTIE: 22,7%



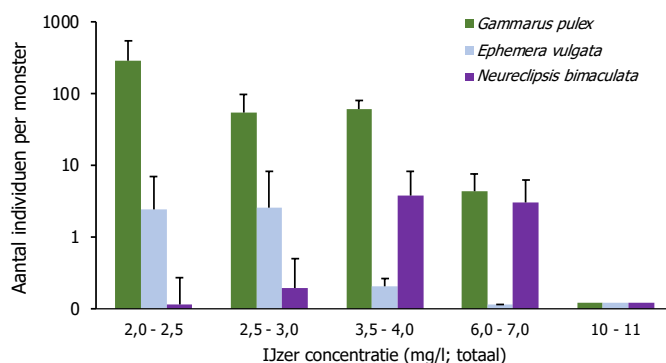
Uit figuur 2.18 valt verder op te maken, dat veel van de door CANOCO als meest onderscheidend aangeduide soorten tot de vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers behoren (weergegeven op een groene ondergrond). Dit geldt zowel voor soorten die aan hogere stroomsnelheden als aan hogere totaal ijzerconcentratie zijn gelieerd. Dit betekent dat niet iedere soort op dezelfde manier op verhoogde ijzerconcentraties reageert (wat overigens niet verrassend is). Deze interspecifieke verschillen zijn in figuur 2.19 geïllustreerd

31 Wederom: totaal ijzer wordt gebruikt als indicatorparameter voor de effecten van ijzerrijke kwel, waarbij men zich telkens moet realiseren dat ijzerrijke kwel ook voor andere parameters tot verhoogde concentraties (en/of effecten) kan leiden. Zo wijzen de pijlen voor sulfaat, Mg, K, chloride en diepte in dezelfde richting als totaal ijzer.

aan de hand van het verloop in de dichtheden van de vlokreeft *Gammarus pulex*, de haft *Ephemera vulgata* en de kokerjuffer *Neureclipsis bimaculata*. Hieruit blijkt dat de dichtheden van de vlokreeft al beginnen af te nemen in de categorie locaties met een totaal ijzerconcentratie van 2,5-3,0 mg/l. Voor de haft dalen de dichtheden voor het eerst bij de groep locaties met een totaal ijzerconcentratie tussen de 3,5 en 4,0 mg/l, terwijl de dichtheden van de kokerjuffer eerst toenemen. Voor alle drie soorten geldt echter ook, dat deze niet langer worden aangetroffen bij een concentratie van 10 – 11 mg/l.

FIGUUR 2.19

GEMIDDELD AANTAL INDIVIDUEN PER MONSTER, BEREKEND ALS HET GEMIDDELDE VAN DE LOCATIEGEMIDDELDEN WAARDEN (INCL. STDEV). DE VLOKREEFT *GAMMARUS PULEX* (POSITIEF DOMINANT) EN DE HAFT *EPHEMERA VULGATA* (KENMERKEND) ZIJN IN FIGUUR 2.18 GELIEERD AAN LOCATIES MET EEN HOGERE STROOMSNELHEID. DE KOKERJUFFER *NEURECLIPSIS BIMACULATA* (KENMERKEND) AAN LOCATIES MET EEN VERHOOGDE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE. BIJ TOTAAL IJZERCONCENTRATIES >10 MG/L WORDEN GEEN VAN DEZE DRIE SOORTEN MEER AANGETROFFEN



KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

Bovenstaande aandachtspunten rondom de sterke ecologische effecten van stroming en de heterogene verdeling van macrofauna monsters over de gradiënt van totaal ijzerconcentraties (3 locaties > 4 mg/l) worden weerspiegeld in de uitgevoerde kwantielregressies (Figuur 2.20). Zo is er geen verband tussen de totaal ijzerconcentratie en de dichtheid van gevoelige soortgroepen (figuur rechtsboven) en geeft de regressie voor het totaal aantal soorten (midden boven) zelfs een tegengesteld verband (hogere aantallen soorten bij hogere totaal ijzerconcentraties). Alleen voor de EKR-waarde lijkt er een dalende trend bij hogere totaal ijzerconcentraties, maar wederom speelt de heterogene verdeling van monsters over de range aan ijzerconcentraties hier ook een rol in. Als naast totaal ijzer ook de stroomsnelheid aan het model wordt toegevoegd verbetert de model-voorspelling met dalende EKR-waarden door zowel de stroming als de totaal ijzerconcentratie (Figuur 2.20; linksonder). Het toevoegen van stroming als extra parameter maakt het verband met toenemende totaal ijzerconcentraties kwantitatief minder sterk, aangezien stroming en totaal ijzerconcentraties ook in enigerlei mate aan elkaar zijn gecorreleerd (stroming kan tot het wegspoelen van uitgevlokt ijzer leiden). Totaal ijzerconcentraties boven de 4 mg/l worden bijvoorbeeld alleen aangetroffen als de stroming <13 cm/sec is. Zowel deze correlatie als de genoemde aandachtspunten in de dataset maken dat de in tabel 2.8 opgenomen effectpercentages als indicatieve waarden gezien moeten worden.

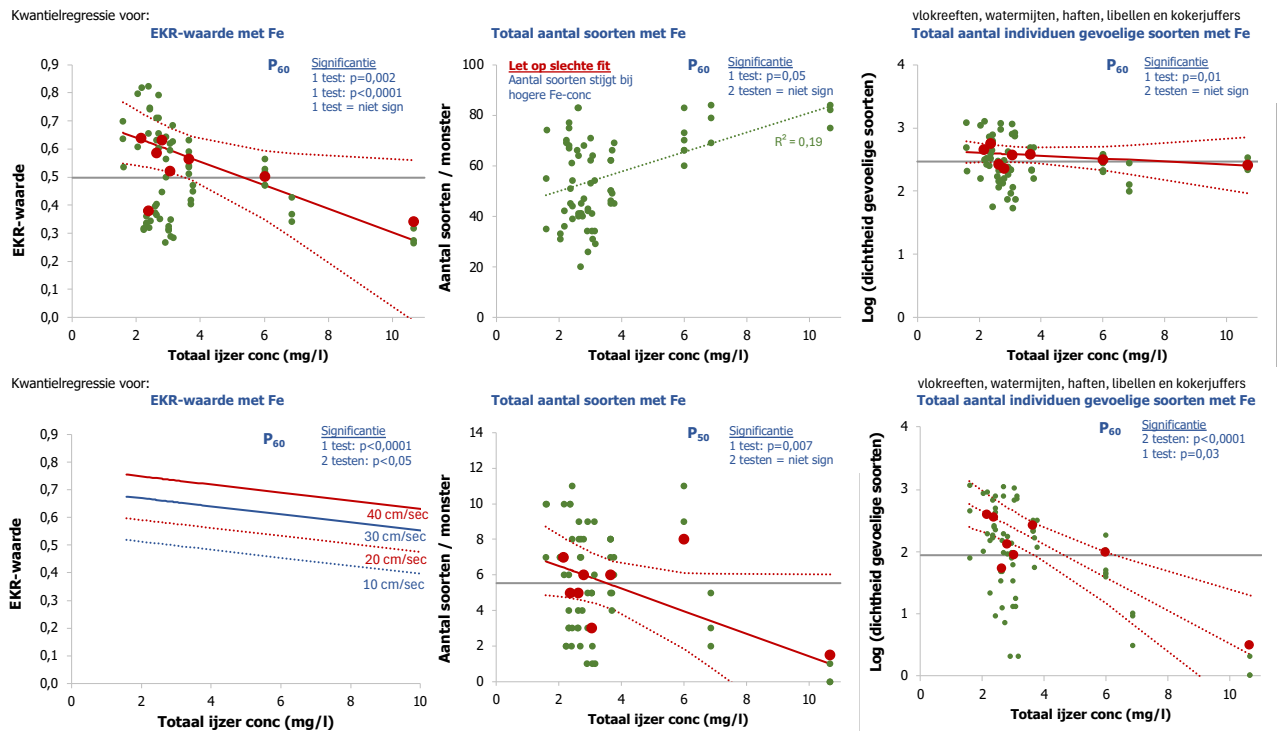


FIGUUR 2.20

BOVENSTE FIGUREN: KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE, AANTAL SOORTEN EN TOTAAL AANTAL INDIVIDUEN VAN GEVOELIGE SOORTGROEPEN MET DE TOTAAL IJZERCONCENTRATIE ALS ENIGE VERKLARENDE VARIABLE.

ONDERSTE FIGUREN: KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE MET ZOWEL TOTAAL IJZER ALS STROMING (LINKS) EN DAARNAAST VOOR DE KENMERKENDE EN DOMINANT POSITIEVE SOORTEN BINNEN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS HET VERBAND TUSSEN TOTAAL IJZER MET ENERZIJD HET AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN ANDERZIJD HET AANTAL INDIVIDUEN (RECHTS).

DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEE GESTIPPTELDE RODE LIJNEN HET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL. DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS



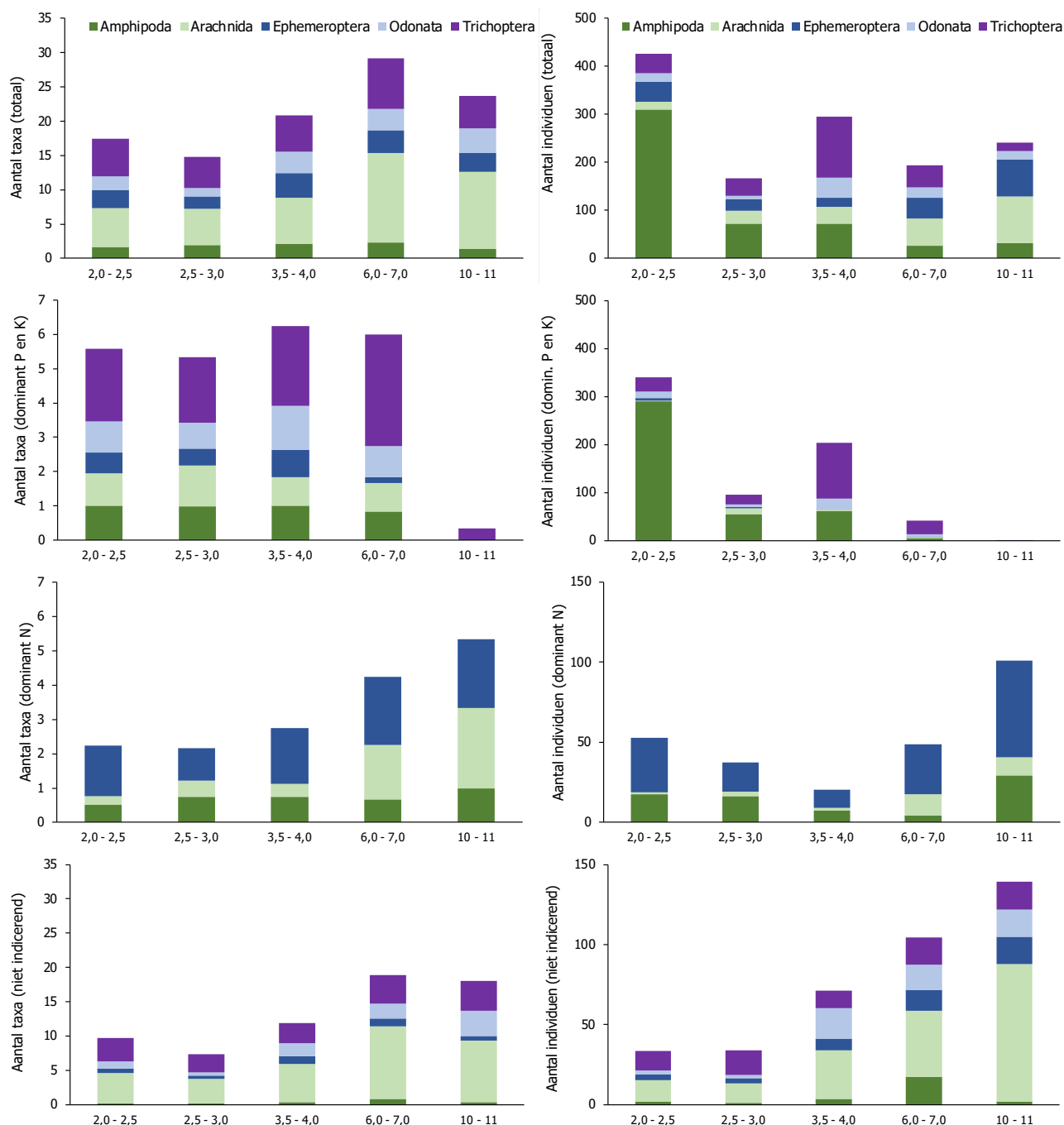
TABEL 2.8 OVERZICHT VAN DE VOOR WATERSCHAP HUNZE EN AA'S BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC_{20} EN EC_{50} -WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, AANTAL SOORTEN EN DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	Model	P _{xx} waarde	EC ₂₀ (mg/l Fe _{tot})	EC ₅₀ (mg/l Fe _{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	Fe	P ₅₀	3,4	8,6	0,042 EKR-waarde
	Fe + stroming	P ₆₀	6,3	>10	0,014 EKR-waarde
Selectie:					
alleen de kenmerkende en dominant positieve taxa binnen de vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers					
Aantal soorten	Fe	P ₅₀	2,4	6,1	0,64 soorten
Dichtheid gevoelige soorten ¹⁾	Fe	P ₆₀	0,37	1,1	67 individuen

¹⁾ Het model (figuur 2.20) is gefit op het logaritme van het aantal individuen. Voor deze effect percentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

Ondanks bovenstaande aandachtspunten rondom de effecten van totaal ijzer op de EKR-waarde is het opvallend dat het totaal aantal soorten noch de dichtheid van de gevoelige soortgroepen enig verband met de totaal ijzerconcentratie vertoonden. Zeker voor de dichtheid van de gevoelige soortgroepen is dit opvallend, aangezien deze parameter in de eerdere case studies juist de gevoeligste parameter was. Aangezien alle 14 locaties van Waterschap Hunze en Aa's als R5 zijn gekenmerkt konden de macrofauna gegevens nader worden opgesplitst in kenmerkende, dominant positieve, dominant negatieve en niet indicerende soorten. Overeenkomstig met figuur 2.20 voor alle taxa, blijkt uit figuur 2.21 dat ook het aantal soorten binnen de gevoelige soortgroepen groter wordt met toenemende totaal ijzerconcentraties alsmede dat de dichtheid van deze taxa niet daalt over het totaal ijzer traject van 2,5 tot 11 mg/l. Dit onverwachte patroon lijkt te zijn veroorzaakt doordat, binnen de als gevoelig aangemerkte soortgroepen, toch niet iedere soort even gevoelig op verhoogde totaal ijzerconcentraties reageert. Dit werd al duidelijk voor enkele individuele soorten (zie figuur 2.19), maar blijkt ook op te gaan bij een onderscheid tussen de groepen kenmerkende en dominant positieve soorten versus de dominant negatieve soorten en/of de niet indicerende soorten als geheel. Binnen de kenmerkende en dominant positieve soorten neemt de dichtheid zoals verwacht af en zijn ze in de groep van 10-11 mg Fe/l vrijwel verdwenen. Ook is het totaal aantal kenmerkende en dominant positieve soorten bij de hoogste totaal ijzer categorie flink afgenomen. Bij de negatief dominante en niet indicerende taxa gebeurt precies het tegenovergestelde: zowel het aantal soorten als hun dichtheid neemt toe met toenemende totaal ijzerconcentraties. Ook voor deze twee parameters zijn daarom kwantielregressies (figuur 2.20) en effect percentages berekend. In overeenstemming met eerdere case studies laten deze effectpercentages zien dat (als alleen naar de kenmerkende en dominant positieve soorten wordt gekeken) de parameter gebaseerd op de dichtheid van gevoelige soorten wederom de gevoeligste parameter is (20% afname in dichtheid bij een 0,37 mg/l hogere totaal ijzerconcentratie).

FIGUUR 2.21 VERBAND TUSSEN HET AANTAL SOORTEN (LINKS) EN AANTAL INDIVIDUEN (RECHTS) VAN DE GEVOELIGE SOORTGROEPEN (VLOKREEFTEN WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN, KOKERJUFFERS) EN TOENEMENDE TOTAAL IJZERCONCENTRATIES (X-AS) MET EEN NADER ONDERSCHIED TUSSEN ALLE TAXA (BOVENSTE RIJ), DE DOMINANT POSITIEVE EN KENMERKENDE TAXA (2^{DE} RIJ), DE DOMINANT NEGATIEVE TAXA (3^{DE} RIJ) EN DE NIET INDICERENDE TAXA (ONDERSTE RIJ). DATA ZIJN GEBASEERD OP LOCATIEGEMIDDELDEN WAARDEN, DIE VERVOLGENS PER CATEGORIE VAN TOTAAL IJZERCONCENTRATIES TUSSEN DE LOCATIES ZIJN GEMIDDELD



2.6 WATERSCHAP AA EN MAAS

Belangrijkste bevindingen:

- Vanuit de beschikbare dataset kon er geen eenduidig verband worden aangetoond tussen toenemende totaal ijzerconcentraties en dalende EKR-waarden, soortantallen of een afnemende dichtheid van soorten uit de gevoelige soortgroepen. Deze constatering werd beïnvloed door verschillende aandachtspunten van de dataset en kan daarom niet eenduidig als een indicatie voor de daadwerkelijke afwezigheid van ecologische effecten gezien worden. De belangrijkste aandachtspunten waren:
 1. het lage aantal locaties met ijzer metingen;
 2. de constatering dat een groot deel van de ijzeranalyses alleen de opgeloste concentraties betrof en
 3. weinig spreiding in de ijzerconcentraties en vooral weinig monsters met een totaal ijzerconcentratie >4 mg/l (bij andere waterbeheerders bleken er boven de 4 mg/l steeds duidelijker effecten op te treden).
- Ondanks de afwezigheid van eenduidige verbanden kwamen de schattingen vanuit de uitgevoerde kwantielregressies redelijk overeen met de ranges, zoals die bij de andere case studies zijn vastgesteld. Zo bleek de EKR-waarde bij de andere waterbeheerders met een waarde van 0,013 – 0,045 te dalen bij iedere extra mg/l totaal ijzer. Voor Waterschap Aa en Maas komt deze waarde op 0,022.

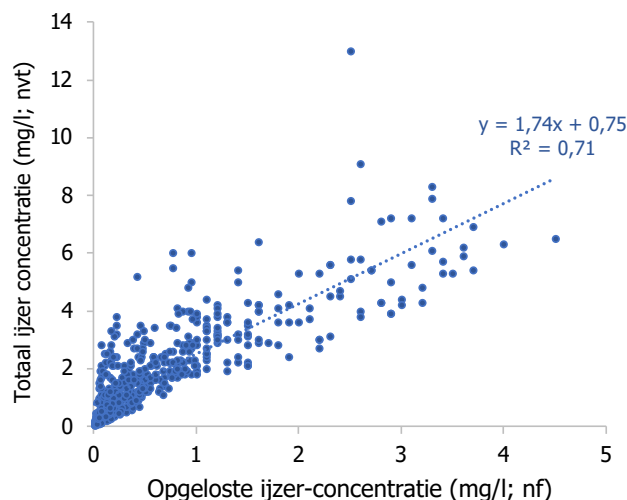
BESCHIKBARE DATASET

De van Waterschap Aa en Maas ontvangen gegevens hadden betrekking op de periode 2010-2023 en omvatte haar gehele beheergebied. Macrofauna-opnames waren van 266 locaties beschikbaar en voor 97 hiervan waren er ook gegevens over allerlei fysisch chemische parameters (maar niet in alle gevallen betrof dit ook de ijzerconcentratie). Mede op basis van haar gebiedskennis heeft het waterschap aangegeven welk chemie-meetpunt aan welke macrofauna locatie gekoppeld kon worden en wat eventueel nog een alternatief chemie-meetpunt kon zijn in het geval er in dit meest passende chemie-meetpunt geen ijzerconcentraties zijn geanalyseerd. Naast de 97 locaties waar zowel macrofauna als allerlei fysische-chemische parameters zijn gemonitord zijn er voor de andere 169 macrofauna locaties nog eens 46 chemie-meetpunten gebruikt. Al met al leverde dit een dataset, waarbij de op 80 locaties gemonitorde ijzerconcentraties aan 266 macrofauna locaties zijn gekoppeld.

Ook het verschil tussen de totaal en opgeloste ijzerconcentraties was een complicerende factor. Totaal ijzerconcentraties zijn op slechts 26 locaties gemonitord en vooral in de periode 2010-2012. Opgeloste ijzerconcentraties waren daarentegen voor alle 80 locaties beschikbaar en omvatten vooral de periodes 2010-2015 en 2018-2023. Uit de 575 simultaan uitgevoerde totaal en opgeloste ijzeranalyses (Figuur 2.22) blijkt dat de totaal ijzerconcentraties met een redelijke betrouwbaarheid uit de opgeloste concentraties zijn te schatten. Zo bleek in 80% van de monsters, dat de berekende totaal concentratie niet meer dan een factor 2 te laag of te hoog was. Vergelijkbare en soms zelfs grotere verschillen worden aangetroffen tussen monsters uit hetzelfde jaar, tussen monsters uit verschillende jaren en tussen locaties. Ondanks het feit, dat iedere aanvullende extrapolatie altijd extra variatie oplevert, is beoordeeld dat het op deze manier vergroten van het aantal bruikbare chemie-meetpunten was te verkiezen boven het noodzakelijkerwijs sterk inperken van de dataset gericht op de resterende 26 locaties, waarvoor totaal ijzerconcentraties gemonitord zijn. Het kunnen beoordelen van de effecten van totaal ijzer op het niveau van een beheergebied als geheel vormde een belangrijke meerwaarde ten opzichte van de eerdere vier meer kleinschalige case studies.

FIGUUR 2.22

RELATIE TUSSEN TOTAAL EN OPGELOSTE IJZERCONCENTRATIES IN 575 INDIVIDUELE MONSTERS



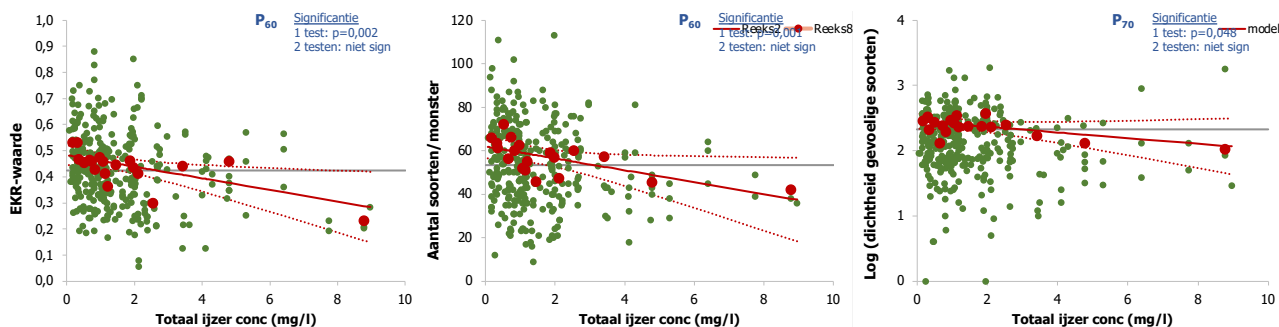
Dit leidde tot een bestand met 791 macrofauna-monsters van 165 verschillende locaties met voor ieder macrofauna-monster een zo goed mogelijk ingeschatte totaal ijzerconcentratie. In het meest optimale geval betrof 'zo goed mogelijk' een jaargemiddelde totaal ijzerconcentratie afkomstig van dezelfde locatie en jaar als het macrofauna-monster. In de meeste gevallen had 'zo goed mogelijk' echter betrekking op allerlei varianten, zoals eenzelfde locatie maar een ander chemie jaar (dan gekozen voor de locatie gemiddelde concentratie), een ander chemie-meetpunt en/of een opgeloste in plaats van totaal ijzerconcentratie etc. Deze aanpak leidde echter tot situaties, waarbij één locatiegemiddelde opgeloste ijzerconcentratie aan wel 40 of meer macrofauna-monsters werd gekoppeld. Zo bleek de op drie monsters gebaseerde locatiegemiddelde (in oorsprong opgeloste) ijzerconcentratie van locatie oLACTBE880 aan 74 macrofauna-monsters van acht locaties gekoppeld te worden. Ondanks het feit dat dit nog steeds de best beschikbare schatting van de totaal ijzerconcentraties kan zijn, gaat deze ene locatiegemiddelde ijzerconcentratie dan wel een grote invloed op de data-analyse krijgen. Dit is onwenselijk en zo'n situatie is dan teruggebracht tot de macrofauna-monsters van dezelfde locatie. In andere situaties waren er meer dan drie macrofauna-monsters van eenzelfde locatie aan één locatie gemiddelde ijzerconcentratie gekoppeld. In deze gevallen is het aantal macrofauna-monsters tot drie teruggebracht. Hierbij zijn de jaren geselecteerd, die het best passend waren op de jaren waar de locatie gemiddelde ijzerconcentraties op gebaseerd was. Na deze opschoning is de uiteindelijke data-analyse gebaseerd op 330 macrofauna-monsters afkomstig van 103 locaties³² met als meest voorkomende watertypen M1a (58 monsters), M3 (57), R4 (68), R5 (44), R6 (45) en R20 (45). De gemiddelde totaal ijzerconcentratie bedroeg 1,5 mg/l met een 25 en 75-percentiel van 0,66 – 2,0 mg/l. Voor 24 macrofauna-monsters bedroeg de totaal ijzerconcentratie >4 mg/l (7% van de monsters) met een maximale concentratie van 9 mg/l, waarbij het in slechts drie gevallen om een daadwerkelijk gemeten totaal ijzerconcentratie ging.

32 Bij locaties waar de macrofauna en chemie monsters beter op elkaar aansloten (zelfde jaren) zijn meer monsters meegenomen.

KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

De uitgevoerde kwantielregressies (Figuur 2.23) laten voor alle drie parameters (EKR, aantal soorten en dichtheid gevoelige soortgroepen) een zwak verband met de totaal ijzerconcentraties zien³³. Zo valt de horizontale grijze lijn (dit is het gemiddelde van de gehele dataset) bij alle drie parameters (net) binnen het 95% betrouwbaarheidsinterval van het best passende model. Dit zal in ieder geval ten dele komen door de hierboven beschreven aandachtspunten in de gebruikte dataset. Desondanks komen verschillende van de ingeschatte effectwaarden (Tabel 2.9) redelijk overeen met de ranges, zoals die bij de andere case studies zijn vastgesteld. Zo bleken de EKR-waarden bij de andere waterbeheerders met een waarde van 0,013 – 0,045 te dalen bij iedere extra mg/l totaal ijzer. Voor Waterschap Aa en Maas komt deze waarde op 0,022.

FIGUUR 2.23 KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS). GROENE PUNTEN GEVEN DE MEETWAARDEN. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEE GESTIPPelde RODE LIJNEN HET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL. DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET. DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS



TABEL 2.9 OVERZICHT VAN DE VOOR WATERSCHAP AA EN MAAS BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC_{20} EN EC_{50} -WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, AANTAL SOORTEN EN DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	Model	P_{xx} waarde	EC_{20} (mg/l Fe_{tot})	EC_{50} (mg/l Fe_{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	Fe	P_{60}	4,4	>10	0,022 EKR-waarde
Aantal soorten	Fe	P_{60}	4,6	>10	2,7 soorten
Dichtheid gevoelige soorten ¹⁾	Fe	P_{70}	2,2	6,9	18 individuen

¹⁾ Het model (figuur 2.23) is gefit op het logaritme van het aantal individuen. Voor deze effect percentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

33 De bij Waterschap Hunze en Aa's toegepaste verdere opdeling van de gevoelige soortgroep (vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers) in kenmerkende en dominant positieve versus de dominant negatieve en/of niet-indicerende soorten kon voor de huidige case studie en die voor Waterschap Rivierenland niet worden toegepast, aangezien de macrofauna monsters over allerlei verschillende watertypen waren verdeeld.

2.7 WATERSCHAP RIVIERENLAND

Balangrijkste bevindingen:

- *Op het niveau van het beheergebied als geheel kon er geen eenduidig verband worden aangetoond tussen toenemende totaal ijzerconcentraties en dalende EKR-waarden, aantal soorten of de dichtheid van gevoelige soortgroepen. Dit lijkt deels door de smalle range aan totaal ijzerconcentraties veroorzaakt te worden. Zo kwamen gemiddelde totaal ijzerconcentraties boven de 4 mg/l niet voor, terwijl bij de andere waterbeheerders de effecten op de macrofauna juist bij deze hogere totaal ijzerconcentraties steeds duidelijker zichtbaar werden.*
- *Dit wil niet zeggen dat totaal ijzerconcentraties <4 mg/l niet tot ecologische effecten kunnen leiden, maar louter dat dergelijke effecten niet eenduidig zijn aan te tonen in de gebruikte, zeer brede set aan macrofauna-monsters met logischerwijs dito variatie in EKR-waarden en aantal soorten. Desondanks passen de voor de EKR indicatief berekende effect concentraties goed binnen het beeld bij de andere waterbeheerders.*

BESCHIKBARE DATASET

Waterschap Rivierenland heeft 171 locaties met in totaal 848 macrofauna-monsters geselecteerd en gekoppeld aan een chemie-meetpunt, waarin de totaal ijzerconcentraties (en andere parameters) zijn gemonitord. Deze dataset is verder opgeschoond aangezien

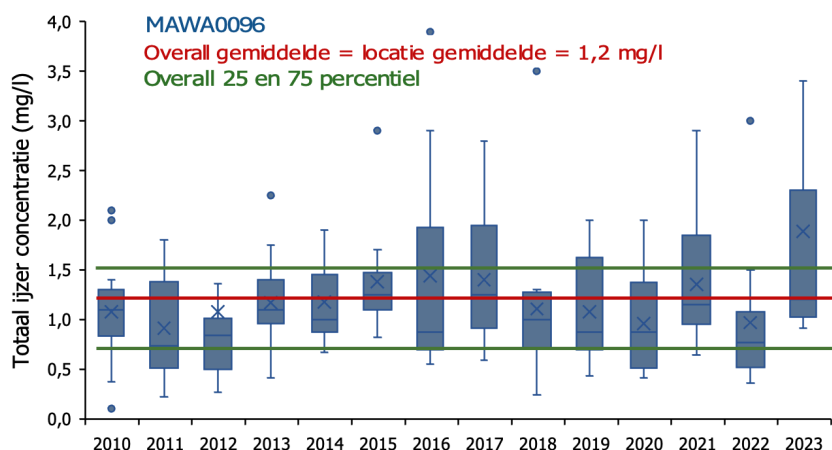
1. de totaal ijzerconcentraties van enkele chemie-locaties op slechts 1 of 2 monsters waren gebaseerd. Deze zijn uit de dataset verwijderd.
2. een locatie gemiddelde totaal ijzerconcentratie soms aan meer dan drie macrofauna-monsters van één locatie waren gekoppeld. In die gevallen is gekozen om alleen de drie macrofauna-monsters in de analyse mee te nemen, die qua jaartal het beste pasten op de jaren, waarin de totaal ijzerconcentraties zijn vastgesteld. Als de ijzer en macrofauna-monsters telkens uit hetzelfde jaar afkomstig waren zijn deze wel allemaal meegenomen.

Dit resulteerde in een uiteindelijke dataset met 533 macrofauna-monsters afkomstig van 96 locaties. Deze 533 monsters zijn verdeeld over 13 verschillende watertypen met de grootste aandelen voor M6 (161 monsters), M3 (91), M1 (83), M10 (65) en R5 (44). De gemiddelde totaal ijzerconcentratie bedroeg 1,2 mg/l met een 25- en 75-percentiel waarde van 0,7 en 1,5 mg/l. De maximale concentratie was 4 mg/l. Deze range aan totaal ijzerconcentraties is daarmee beduidend kleiner dan bij de andere case studies³⁴. Daarnaast is in figuur 2.24 geïllustreerd, dat de variatie in totaal ijzerconcentratie op één locatie zowel binnen als tussen jaren de volledige range tussen de 25 en 75 percentiel waarden van de gehele dataset kan overspannen. De betreffende locatie MAWA0096 is niet gekozen vanwege een grote variatie maar louter omdat i) de ijzerconcentraties hier over alle jaren van 2010-2023 zijn geanalyseerd en ii) de gemiddelde waarde van alle 14 jaargemiddelde totaal ijzerconcentraties overeenkomt met de gemiddelde concentratie van de gehele dataset (1,2 mg/l). Dit voorbeeld illustreert, dat niet alleen het projecteren van totaal ijzerconcentraties van een chemie meetpunt naar een macrofauna meetpunt, maar ook tussen jaren van een overeenkomstig meetpunt tot ongewenste variatie kan leiden. Voor eventueel toekomstig onderzoek zou dit betekenen dat de monitoring van de totaal ijzerconcentraties en de macrofauna altijd op dezelfde locatie moeten geschieden, waarbij (gelet op de levenscyclus van veel macrofauna soorten) de totaal ijzerconcentratie wellicht het beste op hetzelfde jaar én de twee direct aan de macrofauna monitoring voorafgaande jaren gebaseerd kan worden. Waterbeheerders wordt dan ook aangeraden om totaal ijzer op te nemen in het analysepakket dat bij veel macrofaunaonderzoek standaard wordt meegenomen (parameters als zuurgraad, zuurstof, geleidbaarheid, hardheid en nutriënten).

34 Dit komt deels doordat veel van de totaal ijzeranalyses zijn uitgevoerd in de grotere watergangen met veel inlaatwater en verantwoordelijk voor het transport van water over grotere afstanden.

FIGUUR 2.24

BOX-PLOTTER ILLUSTRATIE VAN DE VARIATIE IN TOTAAL IJZERCONCENTRATIES BINNEN EN TUSSEN JAREN VAN EEN FREQUENT GEMONITORDE LOCATIE (MAWA0096)

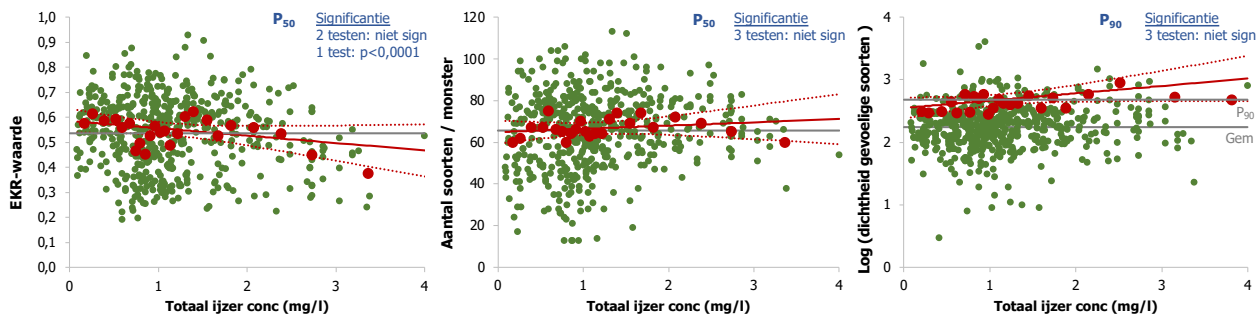


KWANTIFICERING VAN HET EFFECT VAN IJZERRIJKE KWEL

Met de uitgevoerde kwantielregressies kon er geen eenduidig effect van de totaal ijzerconcentratie op het aantal soorten noch op de dichtheid van gevoelige soortgroepen worden vastgesteld (Figuur 2.25). De regressielijn voor de dichtheid van de gevoelige soortgroepen liep zelfs iets omhoog en voor het totaal aantal soorten viel de mediane waarde ruim binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het model. Voor de EKR-waarde liet de kwantielregressie een licht dalende lijn zien, maar ook in dit geval lag de mediane waarde binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het model. Het ontbreken van monsters met een totaal ijzerconcentratie >4 mg/l zal hier van invloed op zijn geweest, temeer daar bij de andere waterbeheerders de effecten op de macrofauna juist bij deze hogere totaal ijzerconcentraties duidelijker werden. Ondanks de afwezigheid van eenduidige effecten passen de voor de EKR indicatief berekende effect concentraties (EC_{20} van 4 mg/l; afname van 0,030 in de EKR voor iedere mg/l totaal ijzer extra; Tabel 2.10) goed binnen het beeld bij de andere waterbeheerders ($1,9 \leq EC_{20} \leq 7,9$; Afname per 1 mg/l totaal ijzer: 0,013 – 0,045).

FIGUUR 2.25

KWANTIELREGRESSIE VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS). GROENE PUNTEN GEVEN DE MEETWAARDEN. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEE GESTIPPELDE RODE LIJNEN HET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL. DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET (IN DE RECHTER FIGUUR IS OOK DE P_{90} -WAARDE OPGENOMEN AANGEZIEN HET MODEL OP DE P_{90} IS GEFIT). DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS



TABEL 2.10

OVERZICHT VAN DE VOOR WATERSCHAP RIVIERENLAND BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES (EC_{20} EN EC_{50} -WAARDEN) VOOR DE EKR-WAARDE, HET AANTAL SOORTEN EN DE DICHTHEID VAN GEVOELIGE SOORTEN ALSMEDE HET EFFECT OP DEZE PARAMETERS BIJ IEDER EXTRA 1 MG/L TOTAAL IJZER

	Model	P_{xx} waarde	EC_{20} (mg/l Fe_{tot})	EC_{50} (mg/l Fe_{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	Fe	P_{50}	4,0	>4	0,030 EKR-waarde
Aantal soorten	Fe	P_{50}		geen goede fit	
Dichtheid gevoelige soorten	Fe	P_{90}		geen goede fit	

3

DISCUSSIE

Zelfs een visuele inspectie van een met ijzerrijke kwel belaste watergang kan al voldoende zijn om duidelijk te maken dat de aanwezigheid van uitvlokkend ijzer tot een verandering van de macrofaunagemeenschap leidt. Het optreden van ijzerrijke kwel is een natuurlijk proces, dat niet alleen tot verhoogde ijzerconcentraties leidt maar ook tot veranderingen in bijvoorbeeld de pH, zuurstofgehalten alsmede in de concentraties van nutriënten, ammonium, mangaan, sulfaat of macro-ionen als calcium, magnesium en bicarbonaat. Dit leidt tot specifieke milieucondities en een daarop aangepaste levensgemeenschap, die in het waterbeheer niet alleen wordt gewaardeerd maar waar mogelijk ook wordt versterkt. De in het voorliggend rapport bestudeerde ‘effecten van verhoogde totaal ijzerconcentraties’ moeten dan ook in dit licht gezien worden en niet worden beschouwd met termen als milieuverontreinigend, toxisch, ongewenste effecten en het zoeken naar maatregelen³⁵.



De focus van het voorliggend rapport is dan ook meer gericht op praktische vragen rondom de range aan ijzerconcentraties waarbij veranderingen in de macrofaunagemeenschap optreden. Hiermee krijgen waterbeheerders een duidelijker beeld over de relevantie van deze effecten in het beheergebied als geheel met als achterliggende vraag of de thans gestelde ecologische doelen wel overal haalbaar zijn. In de KRW-maatlatten zijn deze effecten van ijzerrijke kwel tenslotte niet expliciet meegenomen. De huidige studie is opgezet als pilot,

35 Bij het gebruik van deze terminologie ‘effecten van verhoogde totaal ijzerconcentraties’ dient men zich telkens te realiseren, dat dit geenszins betekent dat het om alleen de toxische effecten van ijzer gaat. Ook de fysieke effecten van ijzerneerslag alsmede de hier genoemde veranderingen in de milieucondities bij kwelsituaties zijn van belang. De beschreven verschillen in de macrofaunagemeenschap zijn telkens de resultante van al deze factoren.

waarmee een eerste indicatief antwoord op bovenstaande vragen wordt gekregen. Een hierbij telkens terugkerend aandachtspunt was de omvang en aard van de beschikbare gegevens. Factoren als een klein aantal locaties, een gebrek aan totaal ijzer metingen waardoor gegevens vaak tussen locaties en/of jaren geprojecteerd moesten worden of een beperkte aanwezigheid van hogere totaal ijzerconcentraties maakten dat de bevindingen uit de case studies vooral kwalitatief van aard zijn. Desondanks behoeft de vraag van de waterbeheerders naar de ruimtelijke omvang en sterkte van de veranderingen in de macrofaunagemeenschap weldegelijk enige mate van kwantificering. Daarom zijn de kwantitatieve data-analyses van iedere case studie nogmaals uitgevoerd maar nu met de volledige, gecombineerde dataset, aangezien sommige aandachtspunten hiermee verkleind worden. Daarnaast zijn de bevindingen gespiegeld aan conclusies vanuit de internationale literatuur.

KWALITATIEVE BESCHRIJVING VAN DE VERANDERINGEN IN DE MACROFAUNAGEMEENSCHAP

Voor de vier waterbeheerders, die een bewust geselecteerde, relatief kleine dataset hebben aangeleverd, kwamen de effecten van verhoogde totaal ijzerconcentraties op de macrofauna (§2.2-2.5) redelijk tot goed met elkaar overeen. Zo lieten de multivariate-analyses bij alle vier waterbeheerders zien, dat de locaties met de hoogste totaal ijzerconcentraties een duidelijk andere plaats in het diagram innemen dan de controlelocaties en eveneens dat locaties met een meer gemiddelde ijzerconcentratie ook een meer intermediaire positie innemen. De samenstelling van de macrofaunagemeenschap verandert kennelijk op een manier, die met de totaal ijzerconcentraties correleert. Voor de enkele locaties, die van dit beeld afwijken, bleek het verwachte effect van totaal ijzer te worden gecompenseerd door een andere stuurfactor met juist een tegengesteld effect op de macrofaunagemeenschap. Dit betrof locaties met een natuurvriendelijke oever (WsZZ), een bredere watergang (WsDD, HHNK)³⁶ of een hogere stroomsnelheid (WsHA).

Naast deze ordening van de macrofaunagemeenschap als geheel gaven de multivariate-analyses ook inzicht in de meest onderscheidende soorten. Hieruit bleek dat soorten, die bij hogere totaal ijzerconcentraties niet of in een veel lagere dichtheid voorkomen, vaak tot de vlokreeften, watermijten, haften, libellen of kokerjuffers behoren. Bij totaal ijzerconcentraties boven de 4 mg/l bleek de gesommeerde dichtheid van deze vijf soortgroepen telkens meer dan 80% lager te liggen dan in de controlelocaties. Tegelijkertijd bleken de dichtheden van oligochaete wormen juist geregeld toe te nemen. Binnen deze soortgroepen kan het effect op individuele soorten echter wel verschillen³⁷. Zo begonnen de dichtheden van de vlokreeft *Gammarus pulex* (positief dominant voor watertype R5) bij Waterschap Hunze en Aa's al af te nemen bij totaal ijzerconcentraties tussen de 2,5-3,0 mg/l. Voor de haft *Ephemera vulgata* (kenmerkende soort voor R5) daalden de dichtheden voor het eerst bij totaal ijzerconcentraties tussen de 3,5 en 4,0 mg/l, terwijl de dichtheden van de kokerjuffer *Neureclipsis bimaculata* (kenmerkend voor R5) eerst toenamen. Voor alle drie soorten geldt echter ook, dat deze niet langer werden aangetroffen bij een totaal ijzerconcentratie boven de 10 mg/l. Deze veranderingen in de macrofaunagemeenschap waren telkens terug te zien in dalende EKR-waarden, een afnemend aantal soorten en/of lagere

36 Breedte is geen stuurfactor maar een locatiemark. De breedte van een watergang kan wel aan allerlei stuurfactoren correleren, zoals het aantal beschikbare habitats, de stroomsnelheid of mate van beschaduwing. Welke hiervan de bepalende stuurfactoren zijn vraagt om een andere analyse. In het voorliggend rapport is alleen gekeken of er boven op de variatie door andere stuurfactoren ook een effect van ijzer is te onderscheiden. Voor de eenvoud zijn allerlei aan breedte gecorreleerde stuurfactoren daarom onder de term 'breedte van de watergang' samengevat. De term breedte is dus niet bedoeld als causaal aangetoonde factor.

37 Als de beschikbare data van direct aan elkaar gekoppelde macrofauna en totaal ijzeranalyses voldoende wordt uitgebreid zou voor iedere individuele soort de gevoeligheid voor totaal ijzer bepaald kunnen worden en zou daarmee vervolgens een SSD (Species Sensitivity Distribution) kunnen worden opgesteld.

dichtheden van de gevoelige soortgroepen. Wel moet worden opgemerkt dat de omvang van deze veranderingen niet overal even sterk was. Dit betrof vooral de effecten op het aantal soorten. Dit is niet geheel onverwacht. Zo kunnen de dichtheden van gevoelige soortgroepen al fors zijn afgenomen, maar zolang er ten minste één individu overblijft is het totaal aantal soorten nog steeds ongewijzigd. Voor de EKR-waarde geldt iets vergelijkbaars. Deze reageert tenslotte niet alleen op aantallen soorten (binnen specifieke deelmaatlaten) maar ook op onderlinge verhoudingen³⁸ in dichtheid van dominant negatieve, dominant positieve en/of kenmerkende taxa.

Kenmerkend voor deze vier case studies is dat ze zijn uitgevoerd met een bewust geselecteerde groep locaties, waardoor de ecologische variatie als gevolg van andere factoren (naast ijzer) relatief klein was. Zo hadden drie van de vier betrokken waterbeheerders slechts één watertype geselecteerd (HHNK uitgezonderd³⁹). Dit vergroot de kans, dat een verandering in de macrofauna door verhoogde totaal ijzerconcentraties ook eenduidig kan worden aangetoond. Bij de andere twee waterbeheerders (§2.6-2.7) is de gebruikte dataset uit het gehele beheergebied afkomstig en was bijvoorbeeld de variatie aan watertypen veel groter. Daarnaast wordt het eenduidig kunnen karakteriseren van veranderingen door ijzerrijke kwel ook beïnvloed door de range aan totaal ijzerconcentraties en vooral de mate waarin hoge totaal ijzerconcentraties in de dataset aanwezig zijn. Zo was er in de dataset van Waterschap Rivierenland geen betekenisvol effect van totaal ijzer aantoonbaar. Dit was gekoppeld aan de afwezigheid van monsters met een totaal ijzerconcentratie boven de 4 mg/l (bij andere waterbeheerders bleken er boven de 4 mg/l steeds duidelijker effecten op te treden). Iets vergelijkbaars gold voor de data van Waterschap Aa en Maas. Hier waren weliswaar enkele monsters met hogere totaal ijzerconcentraties aanwezig, maar dit betrof slechts 7% van alle monsters, mede waardoor er ook bij deze waterbeheerder geen eenduidig effect kon worden aangetoond. Overigens wil het niet kunnen aantonen van zo'n effect van totaal ijzer niet zeggen, dat zo'n effect er niet is, maar louter dat dit in de brede dataset met veel variatie door andere variabelen en verschillende andere aandachtspunten niet aantoonbaar was. Het is zeker mogelijk dat locatiespecifieke kenmerken er voor zorgen, dat een vergelijkbare totaal ijzerconcentratie niet op iedere locatie tot evenveel veranderingen in de macrofaunagemeenschap leidt. Aan de andere kant is het onlogisch om te veronderstellen dat (bijvoorbeeld) het verstikkende effect van op kieuwen uitvlokkend ijzer niet zou optreden als de locatie ook een lagere nutriënten belasting of bredere watergang zou hebben. Zoals eigenlijk voor alle stuurfactoren geldt ook voor ijzer dat er een gradiënt van oplopende concentraties is. Lage concentraties hebben dan nog geen effect, terwijl iets verhoogde concentraties een licht effect geven dat samen met allerlei andere variabelen de macrofaunagemeenschap stuurt. Uiteindelijk kunnen er ook zodanig hoge concentraties bereikt worden, dat het effect van totaal ijzer dominant is en andere factoren de EKR-waarde en/of macrofaunagemeenschap hier niet meer voor kunnen compenseren. In de verschillende figuren was dit terug te zien in de afwezigheid van monsters in de rechter bovenhoek (bij hoge ijzerconcentraties komen hoge waarden voor de EKR, het aantal soorten of de dichtheid van gevoelige soorten niet langer voor).

KWANTITATIEVE BESCHRIJVING VAN DE VERANDERINGEN IN DE MACROFAUNAGEMEENSCHAP

Zoals in §2.1 is toegelicht werd iedere case studie door één of meerdere aandachtspunten rondom de data-analyse gekenmerkt. Dit betrof bijvoorbeeld een tekort aan monitoringsgegevens bij hogere totaal ijzerconcentraties, een überhaupt laag aantal totaal ijzeranalyses

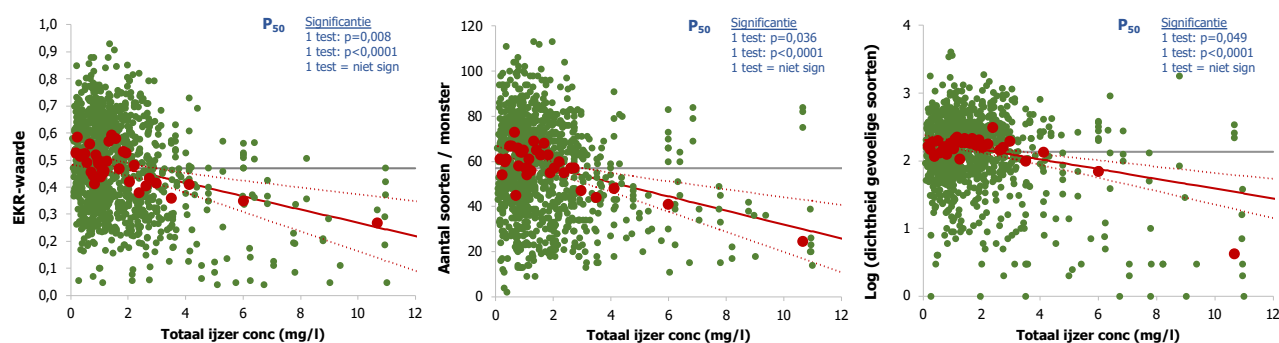
³⁸ In tegenstelling tot maatlaten, die op de absolute dichtheid van soorten reageren.

³⁹ Ook bij de grotere datasets van de waterschappen Rivierenland en Aa & Maas (§2.6-2.7) zijn meerdere watertypen betrokken.

en een laag aandeel aan situaties, waarbij zowel de macrofauna als de totaal ijzeranalyses van dezelfde locatie en hetzelfde jaar afkomstig waren. Dit maakte niet alleen bovenstaande kwalitatieve karakterisering minder zeker, maar had vooral consequenties voor het kwantificeren van de ecologische effecten. Aangezien niet iedere case studie door dezelfde aandachtspunten en/of in dezelfde mate werd gekenmerkt is besloten om alle case studies samen te voegen en de kwantificering van de ecologische effecten op deze gezamenlijke dataset te baseren. Hierdoor wordt het effect van sommige aandachtspunten weliswaar kleiner en de analyse daarmee betrouwbaarder, maar ook deze gezamenlijke dataset is verre van optimaal. Dit komt vooral doordat de beschikbare data niet het gevolg zijn van een gerichte monitoring naar de verschillen bij variërende totaal ijzerconcentraties. Bij een eventueel besluit om de effecten van ijzerrijke kwel nader te kwantificeren is een dergelijk gericht onderzoek dan ook een belangrijk verbeterpunt.

De kwantielregressies, die op de gezamenlijke dataset zijn uitgevoerd, laten zoals verwacht een meer eenduidig beeld van de ecologische effecten zien (Figuur 3.1). Dit blijkt vooral uit het feit, dat de gemiddelde waarde (grijze lijnen in figuur 3.1) van zowel de EKR-waarde, het totaal aantal soorten als de dichtheid van gevoelige soortgroepen telkens buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval van het beste model ligt (de rode stippellijnen). Dit is terug te zien in het feit, dat telkens twee van de drie uitgevoerde testen concluderen dat het beste model een statistisch significante verbetering oplevert ten opzichte van de nulhypothese dat de totaal ijzerconcentratie geen effect op de genoemde parameters heeft. Een belangrijke reden voor deze verbeterde kwantificering lijkt de toename van het aantal monsters met een totaal ijzerconcentratie >4 mg/l (dit betreft nu 77 monsters).

FIGUUR 3.1 KWANTIELREGRESSIES VOOR DE EKR-WAARDE (LINKS), HET AANTAL SOORTEN (MIDDEN) EN HET LOGARITME VAN DE DICHTHEID AAN GEVOELIGE SOORTEN (SOM VAN DE VLOKREEFTEN, WATERMIJTEN, HAFTEN, LIBELLEN EN KOKERJUFFERS; RECHTS) OP BASIS VAN DE GEZAMENLIJKE DATASET VAN ALLE ZES WATERBEHEERDERS. GROENE PUNTEN GEVEN DE MEETWAARDEN. DE RODE LIJN GEEFT DE BEST PASSENDE MODEL FIT EN DE TWEË GESTIPPelde RODE LIJNEN DE 95% BETROUWBAARHEIDINTERVALLEN. DE HORIZONTALE GRIJZE LIJN GEEFT HET GEMIDDELDE VAN DE GEHELE DATASET. DE RODE CIRKELS ZIJN PUUR TER ILLUSTRATIE TOEGEVOEGD EN GEVEN DE HANDMATIG BEREKENDE PERCENTIELWAARDEN ALS DE OP TOTAAL IJZER GEORDENDE MONSTERS WORDEN INGEDEELD IN HET AANTAL BINS, GELIJK AAN DE WORTEL VAN HET AANTAL MONSTERS



De met dit model te berekenen effectpercentages zijn opgenomen in tabel 3.1 en laten zien dat:

- de dichtheid van gevoelige soortgroepen een meer gevoelige parameter is dan de EKR-waarde en het totaal aantal soorten. Zo was er bij een totaal ijzerconcentratie van 1,3 mg/l al sprake van een afname met 20% (de EC_{20} -waarde), terwijl een vergelijkbare afname van de EKR-waarde en het totaal aantal soorten pas bij 4 mg/l optreedt.
- eenzelfde verschil is terug te zien in de 50%-effect concentraties (EC_{50} -waarden van 4 respectievelijk 10 mg/l)
- bij iedere toename van de totaal ijzerconcentratie met 1 mg/l neemt de EKR-waarde met

0,025 af, daalt het aantal soorten met 3 en het aantal individuen van gevoelige soortgroepen met ongeveer 20⁴⁰.

Daarnaast blijken deze effectwaarden een redelijk gemiddeld beeld te geven van de meer indicatieve waarden, zoals die voor iedere afzonderlijke case studie zijn berekend (§2.2-2.7).

TABEL 3.1 OVERZICHT VAN DE BEREKENDE EFFECTPERCENTAGES OP BASIS VAN DE GECOMBINEERDE DATASET

	EC ₂₀ (mg/l Fe _{tot})	EC ₅₀ (mg/l Fe _{tot})	Afname per 1 mg/l totaal ijzer
EKR-waarde	4,2	10,5	0,025
Aantal soorten	4,1	10,1	3,1
Dichtheid gevoelige soorten ¹⁾	1,3	4,1	17

¹⁾ Het lineaire model (figuur 3.1) is gefit op het logaritme (¹⁰log+1) van het aantal individuen. Voor deze effectpercentages is teruggerekend bij welke totaal ijzerconcentratie het aantal individuen met 20 dan wel 50% is afgenomen. Voor de dichtheid is gekeken naar de gemiddelde afname per mg Fe over het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

LABORATORIUM STUDIES NAAR DE EFFECTEN VAN IJZER

In de literatuur zijn verschillende reviews beschikbaar over de toxische effecten van ijzer (Peters et al., 2012; Vuori; 1995 en referenties daarin). Deze auteurs concludeerden onder meer dat de directe, toxische effecten van opgelost ijzer ondergeschikt zijn aan de meer indirecte, fysische effecten van ijzer(hydr)oxide neerslagen. In meerdere laboratorium testen werden de eerste effecten dan ook pas vastgesteld bij totaal ijzerconcentraties, die de oplosbaarheid overschreden (Randall et al., 1999). Het vaststellen van eenduidige waterkwaliteitscriteria op basis van de voor andere metalen toegepaste methoden wordt hierdoor voor ijzer bemoeilijkt. Om toch enig gevoel te krijgen is in tabel 3.2 een globaal overzicht opgenomen van de meer gevoelige acute en chronische testen. Hieruit blijkt dat voor meerdere soorten de eerste effecten al bij totaal ijzerconcentraties <1 mg/l kunnen optreden. Tegelijkertijd blijkt ook, dat deze effectniveaus sterk kunnen variëren afhankelijk van waterkwaliteitsparameters als pH, hardheid en DOC. Het samenspel tussen deze parameters en het al dan niet optreden van precipitatie en indirecte fysische effecten maakt het vanuit een puur ecotoxicologisch perspectief lastig om betrouwbare waterkwaliteitscriteria vast te stellen. Tegelijkertijd zal het voor de aquatische levensgemeenschap onder veldcondities niet zo relevant zijn of er nu soorten verdwijnen door de directe of juist de indirecte effecten. Daarom is hieronder ook gekeken naar beschikbare inzichten vanuit veldstudies.

TABEL 3.2 OVERZICHT VAN DE TOXISCHE EFFECTEN VAN IJZER OP ENKELE VAN DE MEER GEVOELIGE SOORTEN.

Groep	Soort, parameter en testduur		IJzer concentratie ¹⁾ mg/l)	Bronnen van variatie	Referentie
Acute testen					
Haften	Ephemerella subvaria	LC ₅₀	0,32		Peters <i>et al</i> (2012)
Chronische testen					
Algen	Raphidocelis subcapitata	EC _{10, groei} : 72 uur	0,44 – 9,6	pH, hardheid, DOC	Cardwell <i>et al</i> (2023)
Watervlo	Ceriodaphnia dubia	EC _{10, reproductie} : 7d	0,38 – 15,9	pH, hardheid, DOC	Cardwell <i>et al</i> (2023)
	Daphnia magna	NOEC _{reprod} : 21d	0,16		Peters <i>et al</i> (2012)
	Daphnia longispina	NOEC _{reprod} : 21d	0,50		Peters <i>et al</i> (2012)
	Daphnia pulex	NOEC _{reprod} : 21d	0,63		Peters <i>et al</i> (2012)
Vis	Pimephales promelas	EC _{10, groei} : 7d	0,19 – 58,3	pH, hardheid, DOC	Cardwell <i>et al</i> (2023)
	Pimephales promelas	NOEC _{sterfte} : 33d	0,32		Peters <i>et al</i> (2012)

1) In meerdere reviews wordt geconstateerd, dat het moeilijk is om vast te stellen of de waargenomen effecten nu alleen door opgelost ijzer zijn veroorzaakt of ook door meer fysische effecten van uitgevlokt ijzer.

- 40 Het lineaire model is gefit op het logaritme van de dichtheden. Bij het terugrekenen van deze waarden naar werkelijke dichtheden maakt het uit over welk traject van totaal ijzerconcentraties dit wordt berekend. De nu opgenomen waarde is gebaseerd op het traject van 1 – 10 mg/l totaal ijzer.

VELDSTUDIES NAAR DE EFFECTEN VAN IJZER

In de recentere literatuur zijn twee studies aangetroffen, waarbij gegevens uit de simultane monitoring van macrofauna en ijzerconcentraties zijn gebruikt voor het vaststellen van waterkwaliteitscriteria. Linton *et al* (2007) maakten gebruik van een dataset over de jaren 1996-2001 afkomstig uit de Amerikaanse staat West Virginia, waarbij de macrofauna tot op familie niveau werd gedetermineerd. De door Peters *et al* (2012) gebruikte Engelse dataset omvatte 3397 monsters afkomstig van 1617 locaties over de periode 1995 – 2003. In beide studies waren de meeste monsters afkomstig uit stromende wateren, zijn de relaties gebaseerd op simultane chemische en biologische monitoring op dezelfde locaties en zijn de voorgestelde waterkwaliteitscriteria met kwantielregressies vastgesteld. Deze directe koppeling tussen chemische en biologische monitoring maakt dat deze twee veldstudies, in vergelijking met het voorliggende onderzoek, een kleinere onzekerheid kennen.



De door Linton *et al* (2007) gebruikte dataset betrof vooral macrofauna-monsters bestaande uit acht samengevoegde zogenaamde ‘kick samples’⁴¹, waarbij er vier in een snel stromend en vier in een langzamer stromend deel van de rivier zijn verzameld en in totaal zo’n 2 m² aan sediment werd bemonsterd. Referentie locaties bestonden uit zo goed mogelijk vergelijkbare, stromende wateren maar met een zo klein mogelijk antropogene invloed. De kwantielregressie was gericht op de totaal ijzerconcentratie als verklarende variabele, enerzijds omdat deze concentraties zeer frequent in de uitgevoerde monitoring waren meegenomen en anderzijds omdat dit de vele complicerende factoren en daardoor variabelere opgeloste ijzerconcentratie voorkwam. Als eerste stap is gekeken naar de gevoeligheid voor totaal ijzer bij acht verschillende macrofauna-families (voor andere taxa waren er meestal onvoldoende data beschikbaar). Haften uit de familie Leptophlebiidae bleken de meest gevoelige groep, aangezien individuen van deze groep niet langer werden aange-

41 Kick-sampling betreft een monsternamen techniek voor stromende wateren met een harde bodem van zand, grind of stenen, waarbij het handnet loodrecht op de bodem en met de opening tegen de stroomrichting in wordt geplaatst. Door met de voet de bodem bovenstrooms van dit net te beroeren, spoelen aanwezige organismen met de stroming het net in.

troffen bij totaal ijzerconcentraties $>7,1$ mg/l. Haften uit de familie Baetidae en langpootmuggen (Tipulidae) behoorden tot de minst gevoelige taxa. Tot de gemiddeld gevoelige taxa behoorden de haften families Heptageniidae en Ephemerellidae, kokerjuffers uit de familie Philopotomidae en waterkevers uit de familie Psephenidae (Keikevers). Als basis voor het vaststellen van een waterkwaliteitscriterium keken Linton *et al* (2007) enerzijds naar de totaal ijzerconcentratie, waarbij het 90-percentiel van het aantal individuen binnen gevoelige taxa met 20% is afgenomen en anderzijds naar de totaal ijzerconcentratie, waarbij het 90-percentiel van het aantal individuen van gemiddeld gevoelige taxa met 50% is afgenomen. Het waterkwaliteitscriterium op basis van de afname van het aantal individuen binnen gevoelige taxa met 20% werd gebaseerd op de haften familie Leptophlebiidae en resulteerde in een grenswaarde voor de totaal ijzerconcentratie van 0,21 mg/l. Vanuit het beoogde beschermingsniveau zou deze 0,21 mg/l totaal ijzer de bovengrens vormen voor situaties, waarbij er 'geen of maximaal onbeduidende effecten op de macrofaunagemeenschap' optreden. Het tweede waterkwaliteitscriterium richtte zich op kleine tot matige effecten, was gebaseerd op een 50% afname in de dichtheid van de op drie na gevoeligste macrofauna familie (de waterkevers Psephenidae) en kwam uit op een totaal ijzerconcentratie van 1,74 mg/l.

Peters *et al* (2012) kozen een iets andere insteek met waterkwaliteitscriteria, gebaseerd op de overgang van een goede naar een matige ecologische status. De auteurs concludeerden dat de maximaal te behalen ecologische kwaliteitsratio van vis, waterplant en diatomeeën gemeenschappen geen statistisch significante afname bij toenemende totaal ijzerconcentraties liet zien. Bij de macrofauna werd zo'n significante afname wel vastgesteld, waarbij de tien meest gevoelige macrofaunagroepen (wederom) tot de haften (Caenidae, Ephemeridae, Ephemerellidae en Heptageniidae), kevers (Elmidae en Gyrinidae) en kokerjuffers (Goeridae, Polycentropodidae en Rhyacophilidae) behoorden en in dit geval ook steenvliegen (Perlodidae) als gevoelig werden aangemerkt. Verder concludeerden Peters *et al* (2012) dat de grenswaarden iets hoger waren dan de NOEC-waarden voor de meest gevoelige soorten uit ecotoxicologische laboratorium studies maar eveneens lager waren dan de bijbehorende LOEC-waarden⁴². Daarnaast concludeerden de auteurs dat de door Linton *et al* (2007) gekozen methodiek minder goed toepasbaar was, aangezien deze werkwijze onvoldoende rekening hield met het feit dat niet alle taxa in alle bemonsterde habitats konden voorkomen. Daarnaast bleek uit voorbereidende analyses dat de zeldzamere taxa meer gevoelig voor totaal ijzer leken te zijn dan de meer algemeen voorkomende taxa. De 25% meest gevoelige taxa werden daarom geselecteerd middels het (voor ieder taxa en iedere locatie) vergelijken van aangetroffen en voorspelde individuen rekening houdend met het door de kwantielregressie voorspelde effect van de totaal ijzerconcentratie. Ondanks het feit dat deze methode verschilde met die van Linton *et al* (2007) identificeerde ook Peters *et al* (2012) haften uit de families Leptophlebiidae, Heptageniidae en Ephemerellidae als gevoelige soortgroepen. De door hen vastgestelde grenswaarden richtten zich enerzijds op bescherming van de meest gevoelige soorten (0,73 mg/l aan totaal ijzer) en anderzijds op de overgang van een goede naar matige ecologische status (gebruik makend van de parameters, zoals die werden toegepast in de beoordeling conform de Kader Richtlijn Water; 1,84 mg/l aan totaal ijzer). Bij dit criterium van 1,84 mg/l werd nog geen rekening gehouden met andere waterkwaliteitsparameters als de pH, hardheid of DOC. Na aanpassing hierop werd geconcludeerd dat een waarde van 0,77 mg/l totaal ijzer beschermend is voor de overgang van goed naar matig onder gevoelige condities met een lage hardheid en DOC concentratie. Ten slotte merkten Peters *et al* (2012) op dat situaties, waarbij het aanwezige ijzer nog transformeert van Fe^{2+} naar Fe^{3+} , sterkere effecten lijken

42 NOEC = No Observed Effect Concentration; LOEC = Lowest Observed Effect concentration

te veroorzaken dan wanneer deze omzetting is voltooid. Tussenproducten als FeOH^{2-} en $\text{Fe}(\text{OH})_2$ zijn hier wellicht debet aan.

Ondanks de overeenkomsten in de meest gevoelige taxonomische families tussen beide studies, kunnen er binnen families evengoed verschillen in de soortspecifieke gevoeligheid bestaan. Zo bleek een driemaandse *in-situ* blootstelling aan totaal ijzerconcentraties oplopend tot 1,64 mg/l geen effecten op de haft *Leptophlebia marginata* te veroorzaken (Gerhardt & Westermann, 1995), terwijl deze haft tot de hierboven als meest gevoelige familie benoemde Leptophlebiidae behoort. De auteurs merkten op, dat deze afwezigheid van effecten wellicht (deels) door het foerageergedrag komt. *L. marginata* is een van de weinige haften, die op kleine partikels foerageert. Andere haften, zoals de Heptageniidae *Epeorus sylvicola* en *Rhitrogena iridina* zijn meer grazers, die daardoor wellicht minder makkelijk toegang tot hun (met uitgevlokt ijzer afgedekte) voedselbron hebben. In ieder geval viel op, dat deze grazende haften benedenstrooms van de bestudeerde ijzerrijke bron (binnenkomend grondwater) niet langer werden aangetroffen.

In een andere veldstudie (Rasmussen & Lindegaard, 1988; reviewed in Peters *et al.*, 2012) leidde hogere ijzer (Fe^{2+}) concentraties tot een afname van het aantal macrofauna taxa en wel van 67 taxa bij Fe^{2+} concentraties <0,2 mg/l naar 53 bij Fe^{2+} -concentraties tussen de 0,2 en 0,3 mg/l. De verdwenen taxa bestonden vooral uit soorten, die zich bij het foerageren op het begrazen van biofilms richten. Bij nog weer hogere Fe^{2+} -concentraties nam het aantal taxa verder af tot aan 10 taxa bij Fe^{2+} -concentraties van 10 mg/l. Haften en steenvliegen werden alleen bij lage ijzerconcentraties aangetroffen, terwijl de taxa die bij hoge ijzerconcentraties nog aanwezig waren vooral tot de oligochaete wormen (Tubificidae), dansmuggen en langpootmuggen behoorden.

Ook in een review van eerder uitgevoerde mesocosm-studies⁴³ (Clements *et al.*, 2019) werd geconcludeerd dat de sterkste effecten van ijzer (en verschillende andere metalen als koper) telkens werden aangetroffen bij de drie haften families Ephemerellidae, Heptageniidae en Baetidae. Verder bleek uit deze studie dat ook dansmuggen sterk op verhoogde ijzerconcentraties kunnen reageren en dat ijzer het enige metaal was dat effecten veroorzaakte op de twee filter-feeding groepen van kokerjuffers (Brachycentridae and Hydropsychidae). Ook gaf deze studie aan, dat verschillende eigenschappen rondom morfologie (bijv. grootte en kieuwen) en levenswijze (aantal generaties per jaar) significant correleerden met de gevoeligheid voor metalen. Ook Cadmus *et al.* (2018a,b) hebben (10-14 daagse) mesocosm studies (samen met verschillende chronische toxiciteit studies) gebruikt bij het afleiden van waterkwaliteitscriteria. De auteurs concludeerden dat voor drie taxa de EC_{20} -waarden in mesocosm studies onder de eerder (op basis van single species toxiciteitstesten) voorgestelde grenswaarde van 499 µg/l totaal ijzer lagen, namelijk de haft *Epeorus* sp. (335 µg/l), de kokerjuffer *Micrasema* sp. (356 µg/l) en de dansmug *Tanytarsini* sp. (234 µg/l). Op basis hiervan stelden de auteurs een waterkwaliteitscriterium voor totaal ijzer van 251 µg/l voor.

Samenvattend zijn er meerdere veld en/of mesocosm studies, die effecten op de macrofaunagemeenschap aantonen bij ijzerconcentraties <1 mg/l. De twee grootschalige data-analyses voor stromende wateren (Linton *et al.*, 2007; Peters *et al.*, 2012) en een mesocosm studie (Cadmus *et al.*, 2018) kwamen tot de volgende waterkwaliteitscriteria:

⁴³ In een mesocosm kunnen de effecten van allerlei parameters om een vereenvoudigd ecosysteem worden onderzocht. Daarmee staan deze studies in tussen de complexe veldonderzoeken en laboratorium studies, die zich vaak op een of enkele soorten richten. Proefsloten zijn hier een voorbeeld van.

- voor geen tot onbeduidende effecten op de macrofauna van
 - 0,21 mg/l totaal ijzer op basis van een 20% afname in de dichtheid van gevoelige soorten (Linton et al., 2007)
 - 0,73 mg/l totaal ijzer ter bescherming van de meest gevoelige soorten (Peters et al., 2012)
 - 0,25 mg/l op basis van een 20% afname in de dichtheid van drie gevoelige soorten (Cadmus et al., 2018)
- voor kleine tot matige effecten op de macrofauna van
 - 1,74 mg/l totaal ijzer op basis van een 50% afname in de dichtheid van een gemiddeld gevoelige soortgroep (waterkevers Psephenidae; Linton et al., 2007)
 - 1,84 mg/l aan totaal ijzer op basis van de overgang van een goede naar matige ecologische kwaliteit (Peters et al., 2012). Voor gevoelige omstandigheden (lage hardheid en DOC concentratie) zou dit criterium naar 0,77 mg/l verlaagd moeten worden.

De huidige analyse van de gezamenlijke dataset kwam voor de dichtheid van gevoelige soortgroepen tot een afname van 20% bij 1,3 mg/l totaal ijzer (Tabel 3.1). Qua beschermingsniveau is dit te vergelijken met de bovenstaande concentraties van 0,21 – 0,73 mg/l voor de categorie ‘geen tot onbeduidende effecten’, aangezien ook deze waarden waren gebaseerd op een 20% afname van gevoelige soorten.

Voor de categorie van ‘kleine tot matige effecten’ kwam de huidige analyse tot een grenswaarde van 4 mg/l. Bij hogere concentraties nam de dichtheid van gevoelige soorten met meer dan 50% af en was de EKR-waarde met 20% afgenomen. Qua beschermingsniveau is dit te vergelijken met de twee bovenstaande criteria van 1,74 mg/l (50% afname in dichtheid van een gemiddeld gevoelige soortgroep) en 1,84 mg/l voor de overgang van een goede naar matige ecologische kwaliteit.

Dat de voorliggende Nederlandse analyse tot gemiddeld iets hogere grenswaarden komt dan beide studies uit de literatuur, lijkt niet zozeer te duiden op een verschil in gevoeligheid tussen de Nederlandse, Engelse en Amerikaanse macrofauna maar eerder op de al genoemde aandachtspunten in de Nederlandse dataset. De belangrijkste hiervan zijn een (zeer) beperkt aantal situaties, waarbij de macrofauna en totaal ijzerconcentraties van dezelfde locatie en jaar afkomstig zijn en een beperkt aantal macrofauna monsters afkomstig van situaties met een relatief hoge totaal ijzerconcentratie (>4 mg/l). Voor de voorliggende, als pilot opgezette studie, betekent dit dat er altijd opties zijn om de uitgevoerde data-analyses verder te verfijnen. Denk bijvoorbeeld aan kwantielregressies op basis van sigmoïdale curves, een karakterisering van gevoelige taxa op basis van soortspecifieke regressies in plaats van de groepen vlokreeften, watermijten, haften, libellen en kokerjuffers in zijn geheel als gevoelig te beschouwen of een nadere controle van eventuele veranderingen in de determinaties over de jaren. De verwachting is echter dat, mede door de genoemde aandachtspunten in de dataset, het overkoepelend beeld hierdoor niet wezenlijk zal veranderen en dat de eventueel gewenste vervolgstap vooral moet bestaan uit het uitbreiden van de gekoppelde monitoring van macrofauna en totaal ijzer. Daarbij zou het streven zijn om iedere macrofauna opname telkens te kunnen koppelen aan de gemiddelde totaal ijzerconcentratie over bijvoorbeeld de laatste drie jaar voorafgaand aan deze ecologische monitoring. Een andere onzekere factor is de mogelijke aanwezigheid van meerdere, simultaan optredende stressfactoren. Zo is het goed voorstelbaar, dat in een ideale situatie (waarbij de macrofaunagemeenschap niet is beïnvloed door factoren als een overvloedige aanwezigheid van nutriënten, een tekort aan debiet voor stromende wateren of een gebrek aan habitats door een eenzijdige oeverinrichting) de EKR-waarden, soorten-

rijkdom en dichtheden van gevoelige soortgroepen hoger zouden zijn dan de waarden die nu zijn gekoppeld aan locaties met een totaal ijzerconcentratie <1 mg/l. Aangezien de concentraties, waarbij het effect van totaal ijzer dominant wordt, hierdoor niet wijzigen zou dit tot een steilere helling en daarmee lagere drempelwaarden kunnen leiden⁴⁴.



Zoals eerder betoogd zal er binnen Nederland sprake zijn van een gradiënt aan totaal ijzerconcentraties, waarbij kleine effecten op de macrofauna eenvoudig door andere stuurfactoren met een positief effect genivelleerd kunnen worden. Bij steeds hogere totaal ijzerconcentraties zal deze optie van nivellering steeds kleiner worden en uiteindelijk zal het effect van totaal ijzer het eindoordeel cq. de EKR-waarde gaan bepalen. Het kenmerk van een gradueel verlopende gradiënt is dat de kantelpunten moeilijk zijn te duiden. Desondanks leiden de huidige resultaten tot het advies aan waterbeheerders om allereerst na te gaan hoe de totaal ijzerconcentraties in hun beheergebied zich verhouden tot bovenstaande grenswaarden. Daarbij kan een (globaal) onderscheid gemaakt worden voor concentraties boven de circa 0,5 - 1,5 mg/l als indicatie voor een beginnend effect en als tweede stap concentraties boven de 1,5 – 4 mg/l als indicatie voor matige effecten. In situaties met een lage hardheid en DOC concentratie zou (vanwege de hogere gevoeligheid) deze tweede grenswaarde wellicht nog verlaagd moeten worden.

Hoe groter het aandeel aan watergangen (cq. waterlichamen), die deze grenswaarden overschrijden, hoe relevanter het voor de waterbeheerder wordt om een vervolgstap te zetten en bij de lopende monitoring van de macrofauna ook de totaal ijzerconcentraties consequent mee te nemen. Op die manier wordt begonnen met het verbreden en verbeteren van de dataset. In de toekomst kunnen de effecten van de totaal ijzerconcentraties hierdoor betrouwbaarder gekwantificeerd worden. De in de datasets aangetroffen totaal ijzerconcentraties onderschrijven de relevantie hiervan. Zo varieert de 25-percentielwaarde van de jaargemiddelde totaal ijzerconcentraties binnen de zes bestudeerde datasets tussen de 0,7 en 2,4 mg/l. Dat betekent dat zeker de genoemde bovengrens van 0,5 – 1,5 mg/l ter voorkoming van kleine tot matige effecten in veel wateren overschreden wordt. De bevin-

⁴⁴ Of in andere woorden: als de macrofaunagemeenschap in een watergang door zowel een insecticide als een hoge nutriëntlast wordt beïnvloed, leidt het opheffen van de ene factor slechts tot een eenduidiger beeld over het (nog steeds aanwezige) effect van de andere factor.

dingen leiden daarmee eveneens tot het advies om een proces van gedachtenvorming op te starten rondom het (in specifieke situaties) eventueel aanpassen van de ecologische doelen en/of het ontwikkelen van een meer specifieke maatlat voor deze met ijzer belaste watersystemen. Daarmee zouden deze typische en vaak soortenarmere levensgemeenschappen een hogere, beter passende EKR-waarde krijgen naarmate ze de natuurlijke situatie meer benaderen.

4

REFERENTIES

- Brix, KV, L Tear, DK DeForest & WJ Adams (2023). Development of multiple linear regression models for predicting chronic iron toxicity to aquatic organisms. *Environ Toxicol Chem* 42(6): 1386-1400.
- Cadmus, P, SF Brinkman & MK May (2018a). Chronic toxicity of ferric iron for North American aquatic organisms: Derivation of a chronic water quality criterion using single species and mesocosm data. *Arch Environ Contam Toxicol* 74: 605-615.
- Cadmus, P, H Guasch, AT Herdrich, B Bonet, G Urrea & WH Clements (2018b). Structural and functional responses of periphyton and macroinvertebrate communities to ferric Fe, Cu, and Zn in stream mesocosms. *Environ Toxicol Chem* 37(5): 1320-1329.
- Cardwell, AS, PH Rodriguez, WA Stubblefield, DK De Forest & WJ Adams (2023). Chronic toxicity of iron to aquatic organisms under variable pH, hardness, and dissolved organic carbon conditions. *Environ Toxicol Chem* 42(6): 1371-1385.
- Clements, WH (2004). Small-scale experiments support causal relationships between metal contamination and macroinvertebrate community responses. *Ecological applications* 14(3): 954-967.
- Clements, WH, P Cadmus, CJ Kotalik & BA Wolff (2019). Context-dependent responses of aquatic insects to metals and metal mixtures: A quantitative analysis summarizing 24 Yr of stream mesocosm experiments. *Environ Toxicol Chem* 38 (11): 2486-2496.
- Franken, RJM (1996). Droogvallende en zure beekbovenlopen in de Achterhoek. Aanzet tot een typologische indeling op basis van macrofauna en milieuvariabelen en een analyse van de STOWA beoordeling voor stromende wateren. Zuiveringsschap Oostelijk Gelderland. Afdeling Oppervlaktewaterbeheer.
- Gerhardt, A (1992). Effects of subacute doses of iron (Fe) on *Leptophlebia marginata* (Insecta: Ephemeroptera). *Freshwater Biol* 27: 79-84.
- Gerhardt, A (1994). Short term toxicity of iron (Fe) and lead (Pb) to the mayfly *Leptophlebia marginata* (L.) (Insecta) in relation to freshwater acidification. *Hydrobiologia* 284: 157-168.
- Gerhardt, A & F Westermann (1995). Effects of precipitations of iron hydroxides on *Leptophlebia marginata* (L.) (Insecta: Ephemeroptera) in the field. *Archiv für Hydrobiologie* 133(1): 81-93.
- Hickey, CW & WH Clements (2009). Effects of heavy metals on benthic macroinvertebrate communities in New Zealand streams. *Environ Toxicol Chem* 17(11): 2338-2346.
- Hynes, HBN (1970). The ecology of running waters. Liverpool Univ. Press.
- Kinsman-Costello, LE, JM O'Brien & SK Hamilton (2015). Natural stressors in uncontaminated sediments of shallow freshwaters: the prevalence of sulfide, ammonia and reduced iron. *Environ Toxicol Chem* 34(3): 467 – 479.

- Kotalik, CJ, P Cadmus & WH Clements (2019). Indirect effects of iron oxide on stream benthic communities: capturing ecological complexity with controlled mesocosm experiments. *Environ. Sci. Technol.* 53: 11532–11540.
- Klink, A (2012). Paleo-ecologisch onderzoek van de Overijsselse Vecht. Onderbouwing van maatregelen ten behoeve van ecologisch herstel. Hydrobiologisch Adviesburo Klink. Rapport nr. 121.
- KWR (2022). Berekening met ijzer-houdend grondwater: verkennend onderzoek naar mogelijke effecten op bodemvruchtbaarheid. KWR rapport 2022.093.
- Linton TK, MAW Pacheco, DO McIntyre, WH Clement & J Goodrich-Mahoney (2007). Development of bioassessment-based benchmarks for iron. *Environ Toxicol Chem* 26 (6): 1291-1298.
- Maret, TR, DJ Cain, DE MacCoy & TM Short (2003). Response of benthic invertebrate assemblages to metal exposure and bioaccumulation associated with hard-rock mining in north-western streams, USA. *Journal of the North American Benthological Society* 22(4): 598 – 620.
- Nijboer, R & G Boedeltje (2011). Evaluatie van 23 jaar macrofauna-monitoring bij Waterschap Rijn en IJssel. Bureau Daslook, Lochem. In opdracht van Waterschap Rijn en IJssel.
- Peters A, M Crane & W Adams (2011). Effects of iron on benthic macroinvertebrate communities in the field. *Bull Environ Contam Toxicol* 86: 591 – 595.
- Peters A, G Merrington, P Simpson & M Crane (2012). Proposed quality standards for iron in freshwaters based on field evidence. Water Framework Directive—United Kingdom Technical Advisory Group. SNIFFER/Environmental Agency, Edinburgh, UK. <https://wfd.uk.org/sites/default/files/Media/Iron%20-%20UKTAG.pdf>;
- Randall S, D Harper & B Brierley (1999). Ecological and ecophysiological impacts of ferric dosing in reservoirs. *Hydrobiologia* 395/396: 355 – 364.
- Rasmussen K & C Lindegaard (1988). Effects of iron compounds on macroinvertebrate communities in a Danish lowland river system. *Water Research* 22:1101-1108.
- Reich, JKA, SJ Nichols, WA Maher & BJ Kefford (2019). Is metal flocculation from mining activities a previously overlooked mechanism for impairing freshwater ecosystems? *Science of the Total Environment* 671: 1108 – 1115.
- STOWA (2016). Ecologische sleutelfactor toxiciteit. Deel 2. Kalibratie: toxische druk en ecologische effecten op de macrofauna. STOWA rapport 2016-15B.
- Thorup, J (1966). Substrate type and its value as a basis for limitation of bottom fauna communities in running waters. *Spec. Publs. Pymatuning Lab. Fld Biol.* 4: 59-74.
- Vuori, K-M (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici* 32: 317-329.
- Wilson, MJ, ME McTammany & HR Bohr (2019). Manganese oxides as localized drivers of benthic invertebrate density and community structure. *Hydrobiologia* 838: 85-98.