

Sleutelfactor Toxiciteit



Chemische verontreiniging en ecologische toestand. Onderbouwing van de klassen-indeling voor interpretatie van de sleutelfactor toxiciteit

Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit

Auteurs:

Posthuma, L., J. Beekman, I van Driezum (RIVM)
M. L. De Baat, T. Pronk (KWR Water Cycle Institute)
S. Van den Berg, P. Van den Brink (WEnR)
L. Ostè, W. Verweij (Deltares)

Contact: Leo.Posthuma@rivm.nl

Datum: 17 december 2021

Bij verwijzing naar deze notitie graag de volgende gegevens gebruiken:

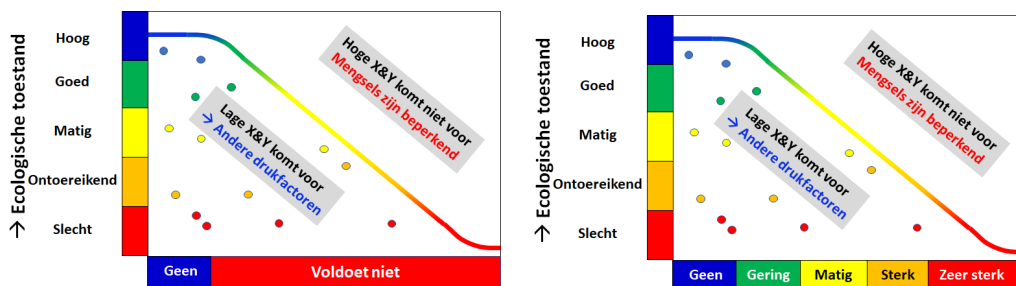
Posthuma, L., M. L. De Baat, J. Beekman, S. Van den Berg, P. Van den Brink, I. Van Driezum, L. Ostè, T. Pronk and W. Verweij (2021). Chemische verontreiniging en ecologische toestand. Onderbouwing van de klassen-indeling voor interpretatie van de sleutelfactor toxiciteit. Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit. Versie 1.1, 17 december 2021. KIWK-Toxiciteit Notitie I-11. Amersfoort, the Netherlands. Kennis Impuls Water Kwaliteit.



Highlights

1. Chemische verontreinigingen vormen een forse belemmering voor het behoud van- en herstel naar een goede ecologische toestand: hoe hoger de toxische druk, hoe hoger de belemmering
2. Om de invloeden van chemische verontreinigingen optimaal terug te dringen is er voor het waterbeheer een vijfklassen-indeling ontworpen, die de relatie tussen toxische druk en de mate van belemmering weergeeft
3. De vijfklassen-indeling is afgestemd op de milieukwaliteitsnormen enerzijds (zodat de kaderrichtlijn water en het stoffenbeleid verbonden blijven via hetzelfde beschermdoel), en met de mate van effecten op aquatische levensgemeenschappen anderzijds (zodat de chemische verontreinigingsklassen relateren aan de ecologische toestandsklassen).
4. De vijfklassen-indeling maakt achteruitgang van de waterkwaliteit genuanceerder zichtbaar dan de beoordeling via alleen normen, en maakt tevens genuanceerder zichtbaar dat maatregelen effect hebben.
5. De huidige tweeklassen-indeling (via toetsing aan stofnormen) blijft belangrijk voor het beoordelen van beschermings- en hersteldoelen per stof
6. De vijfklassenindeling voor chemische verontreiniging is van cruciaal belang om de grote praktijknadelen van de tweeklassen-indeling teniet te doen. De tweeklassen-indeling is namelijk zeer gevoelig voor achteruitgang van de waterkwaliteit, en zeer ongevoelig voor herstel. Deze beide kenmerken zijn niet bevorderlijk voor de praktijk van het waterbeheer.
7. De ecologische sleutelfactor Toxiciteit levert hulpmiddelen waarmee de waterbeheerder de indeling van waterlichamen in de vijf klassen eenvoudig kan uitvoeren.

Grafische samenvatting



→ Druk door & Klassen van mengsels

De ecologische sleutelfactor toxiciteit specificeert in hoeverre de ecologische toestand belemmerd wordt door chemische verontreiniging. Waar (links) de kader richtlijn water een probleem kan signaleren (via de indeling “voldoet/voldoet niet”) voor elke stof afzonderlijk, kan de sleutelfactor toxiciteit inzichtelijk maken wat er in de groep “voldoet niet” gebeurt: is de belemmering klein, middel, of groot? Door dit te weten te komen kan de waterbeheerder maatregelen prioriteren.



Inhoudsopgave

Highlights	2
Grafische samenvatting	2
Inhoudsopgave.....	3
Samenvatting.....	4
1 Inleiding.....	5
2 De essentie: klassen voor chemische verontreiniging	6
2.1 Randvoorwaarde: nut voor prioriteren van maatregelen	6
2.2 Bescherming en de eerste trap voor chemische verontreinigingen.....	6
2.3 Herstel en de tweede trap voor chemische verontreinigingen	7
2.3.1 Ontwerp-beginselen.....	7
2.3.2 Definities en betekenis van vijf chemische verontreinigingsklassen.....	8
2.4 Grenswaarden tussen de chemische verontreinigingsklassen.....	9
2.4.1 Toxische druk van mengsels (msPAF) en ecologische toestand	10
2.4.2 Praktijkbeoordeling van de voorgestelde indeling	12
2.4.3 Responsen in bioassays en de ecologische toestand.....	13
2.5 Chemische verontreinigingsklassen en zuiveringsinspanning.....	13
2.6 Chemische verontreinigingsklassen en nieuwe inzichten.....	13
3 Evaluatie en conclusies.....	15
Colofon.....	17
Referenties.....	17



Samenvatting

Deze notitie onderbouwt een indeling van de chemische verontreiniging van oppervlaktewater in vijf klassen, die geïnspireerd zijn op de indeling in vijf klassen voor de ecologische toestand. De indeling wordt gehanteerd bij toepassing van de ecologische sleutel factor toxiciteit. Waterbeheerders kunnen die sleutel factor gebruiken om kwantitatieve gegevens te verzamelen over de toxische druk van stoffen of van mengsels, door toepassing van een rekentool (die concentratie-gegevens omzet in kwantitatieve informatie over de toxische druk) of van bioassays (die toets-resultaten van oppervlaktewatermonsters omzet in kwantitatieve inzichten informatie over de mate van impact). Door die uitkomsten uit te drukken op een schaal die ook bij de ecologische toestand wordt gebruikt kan de waterbeheerder maatregelen prioriteren, en veranderingen in de waterkwaliteit zichtbaar maken. De indeling is gebaseerd op en in lijn met de klassenindeling van de ecologische toestand volgens de kader richtlijn water (KRW). De grenswaarden tussen de klassen zijn afgeleid met behulp van diverse vormen van effect-onderzoek. De grenswaarden zijn gerelateerd aan het KRW-doel van bescherming enerzijds, en aan soortenverlies en hersteldoelen anderzijds.

Noot: omdat de sleutelfactor toxiciteit geactualiseerd wordt, en ook de kennis voor deze notitie toeneemt, kan deze notitie geactualiseerd worden.

Noot 2: Naar aanleiding van vragen van waterbeheerders over Figuur 1 en de namen van de klassen is die Figuur in deze versie aangepast, en zijn de namen van de klassen gewijzigd: “sterk” en “zeer sterk” verontreinigd worden nu benoemd als “hoog” en “zeer hoog” qua toxische druk. Dezelfde aanpassing en zijn doorgevoerd op de webpagina en in het Deltafact die over het onderwerp “indeling in vijf verontreinigingsklassen” gaan.



1 Inleiding

Er worden in de praktijk verschillende chemische stoffen in meren, beken of rivieren aangetroffen. Deze belanden daar door natuurlijke oorzaken of door menselijke activiteiten, bijvoorbeeld door afvalwater uit een rioolwaterzuiveringsinstallatie, de toepassing van bestrijdingsmiddelen, of door emissies of incidenten bij fabrieken. Ook kunnen nieuwe economische activiteiten tot emissies van stoffen leiden, die dan de waterkwaliteit nadelig kunnen gaan beïnvloeden. Dan is er sprake van een dreigende aantasting van de waterkwaliteit.

De kaderrichtlijn water (KRW) heeft als hoofddoelen het *beschermen* van de waterkwaliteit waar mogelijk, en het *herstellen* ervan zodra de waterkwaliteit is verminderd. Waterbeheerders worden hierdoor geconfronteerd met de vraag of er voor een waterlichaam sprake is van afdoende bescherming enerzijds, of de noodzaak voor het nemen van herstelmaatregelen anderzijds. Omdat chemische verontreiniging uiterst complex is – omdat er meer dan 170.000 stoffen in de handel zijn en er dus onnoemelijk veel mengsels kunnen vóórkomen – is het wenselijk om een praktijkgerichte indeling te maken: wanneer kan een waterbeheerder constateren dat er sprake is van voldoende bescherming? Wanneer van lagere, gemiddelde of hogere verontreiniging? Dergelijke inzichten zijn belangrijk om maatregelen te prioriteren: de “ergste plekken eerst”, en daarbinnen: “de ergste stoffen eerst”.

Geheel in afstemming met de principes waarop de KRW is gebaseerd schetst deze notitie de indeling van *chemische verontreiniging* in vijf toestandsklassen. Het concept (van vijf klassen) is afgestemd met de definities van de ecologische toestand. De grenswaarden (die de vijf klassen van elkaar onderscheiden) zijn afgeleid van KRW-definities en doelen, en van inzichten in de relaties tussen mengsel-blootstelling en ecologische effecten. Die relaties zijn onderzocht in het KIWK-project Toxiciteit, door middel van studies aan grootschalige monitoring-data sets en aan data sets die langjarig in grote aantallen mesocosm-experimenten zijn verzameld. Beide vormen van onderzoek hebben hun voor- en nadelen, en door beide vormen van gegevens te gebruiken is beoogd een optimale basis te genereren voor de onderbouwing van de vijf toestandsklassen voor chemische verontreiniging. Een voordeel van analyse van monitoringdata is bijvoorbeeld, dat dat direct aansluit bij de vraag naar de mate van effecten in het veld zoals gebruikelijk in de toegepaste ecologie. Een nadeel daarentegen is, dat de data-analyse relatief ongevoelig is, en geen helder inzicht geeft in oorzaak-gevolg relaties. Bij mesocosm-data is de sterke kant onder meer, dat de analyses op gevoelige wijze allerlei inzichten geven in directe en indirecte effecten van blootstelling aan chemische stoffen, maar dat de gegevens geëxtrapoleerd moeten worden naar de diverse typen waterlichamen en naar de diverse andere drukfactoren.

Deze notitie beschrijft de indeling in de vijf klassen, en de onderbouwing ervoor. Zodra de indeling voor de praktijk geaccepteerd wordt, kunnen alle locaties in een beheergebied ingedeeld worden, en kan ook – bijvoorbeeld – het effect van maatregelen geëvalueerd worden. Een Deltafact over de vijfklassen-indeling (Posthuma et al., 2021a) vat de indeling samen, en helpt bij de toepassing ervan; de huidige Notitie is toelichtend, en beschrijft – als achtergrondgegevens – het proces van kennisontwikkeling dat doorlopen is, inclusief toetsing bij Nederlandse waterbeheerders en Europese eco(toxico)logen.

Noot: de toxische druk is een maatlat die afgeleid wordt van directe effecten van chemische stoffen op de groei en reproductie van getoetste soorten, en dus niet op zeer specifieke effecten zoals hormoonverstoring, op effecten die ontstaan via blootstelling van specifieke soorten door de voedselketen, en voor effecten op de mens.



2 De essentie: klassen voor chemische verontreiniging

2.1 Randvoorwaarde: nut voor prioriteren van maatregelen

Heel veel menselijke activiteiten worden ingekaderd in zogenoemde ‘indicatoren-systemen’. Een indicatoren-systeem bestaat altijd uit een maatlat en een toetsingskader. Meestal vervangt het systeem (de maatlat + het toetsingskader + een gemeten waarde) iets ingewikkelds door iets hanteerbaars, met het oogmerk passende conclusies te trekken, bijvoorbeeld:

- De maatlat is snelheid (in km/uur), de toetsingsgrootte is 100 km/uur, en de gemeten waarde is 112 (passende conclusie: boete) of 180 (passende conclusie: ontzegging rijbevoegdheid)
- De maatlat is alcoholpromillage, de toetsingsgrootte is 0,5 promille, en de gemeten waarde is 0,1 (passende conclusie: u kunt rijden), of 0,9 (passende conclusie: educatieve maatregel) of 1,30 (passende conclusie: boete van 650 Euro)

De KRW heeft voor de ecologische toestand een indicatorsysteem, dat bestaat uit vijf toestandsklassen, met een duidelijke definitie en een duidelijk verband met maatregelen:

- Bij de klassen zeer goed en goed moet een beheerder (zo nodig, bijvoorbeeld bij veranderende economische activiteiten) maatregelen nemen om de goede toestand te behouden, en *a priori* de te verwachten emissies van stoffen terugdringen tot een niveau waarbij de goede toestand niet aangetast wordt
- bij de klassen matig, ontoereikend en slecht moet een beheerder maatregelen nemen om de toestandsklasse te verhogen, totdat de goede toestand bereikt is.

Door het onderscheid in drie effectklassen kan de beheerder herstelmaatregelen prioriteren: de grootste maatregelen tegen de ergste aantasting van de waterkwaliteit. Als de toestandsklasse goed is, maar er worden andere economische activiteiten gepland (gepaard gaand met mogelijke emissies van chemische verontreinigingen) dan moet de waterbeheerder preventieve maatregelen nemen om de goede toestand te handhaven. Die worden in de klasse ‘goed’ sterker geïndiceerd dan in de klasse ‘blauw’, omdat ‘groen’ er op duidt dat er weliswaar nog geen effecten zijn ontstaan, maar er wel al sprake is van verhoogde drukfactoren(en) door menselijke activiteiten.

2.2 Bescherming en de eerste trap voor chemische verontreinigingen

Voor het KRW-doel “bescherming” hanteert de KRW een indicatoren-systeem dat per stof beoogt de beoogde graad van bescherming te garanderen. Bij voorgenomen economische activiteiten mag een aanstaande emissie niet leiden tot een situatie waarin de concentratie van een stof zodanig is dat die leidt tot overschrijding van de norm (MKN, Milieu Kwaliteits Norm) van elke afzonderlijk beoordeelde stof.

De maatlat is de concentratie tot aan de norm, de toetsingsgrootte is de norm, en dreigende overschrijding (vanuit de schone situatie gezien) leidt tot verplichte beschermende maatregelen, die de dreigende achteruitgang van de waterkwaliteit voorkomt.

Het indicatorensysteem werkt ook bij bestaande verontreiniging. In dat geval is de concentratie van een stof al boven de norm, en is er dus al sprake van niet-afdoende bescherming. Er moeten maatregelen worden genomen om de waterkwaliteit te herstellen. En wel: tot tenminste de norm (of beter).

Dit huidige KRW-indicatorensysteem voor toxische stoffen heeft in de praktijk twee nadelen:



- Het systeem reageert enerzijds zeer gevoelig op achteruitgang van de waterkwaliteit: het oordeel “voldoet niet” wordt vastgesteld zodra er één stof aanwezig is boven diens MKN.
- Het systeem reageert anderzijds heel ongevoelig op daadwerkelijke terugdringing van toxische stoffen: het oordeel “voldoet niet” blijft aanwezig, zolang er één stof aanwezig is boven diens MKN.
- Doordat het indicatorensysteem werkt voor een fractie van de stoffen die in de handel zijn (ca. 145 van de >170.000 stoffen) is het indicatorensysteem ook niet “dekkend”, en wordt er bovendien geen rekening gehouden met mengsel-effecten. Bekend is, dat twee of meer stoffen samen vrijwel altijd tot een geaggregeerd effect leidt, dat beschreven kan worden met een aantal uit de (eco)toxicologie veel gebruikte mengsel-modellen.

Er is geconstateerd dat deze nadelen de bevordering van de waterkwaliteit door (goed prioriteerbare) maatregelen tegengaat, en blijvende investeringen in herstelmaatregelen demotiveert (vanwege schijnbare afwezigheid van verbeterde waterkwaliteit). Om die reden is er naast het normatieve systeem, dat goed voldoet voor de beoordeling van beschermingsvraagstukken, een tweede trap bij het bestaande indicatorensysteem ontwikkeld, op een wijze die aansluit bij de beschermende normstelling (risico's van stoffen) enerzijds en bij de mate van ecologische effecten (ecologische toestand) bij verontreiniging anderzijds.

2.3 Herstel en de tweede trap voor chemische verontreinigingen

2.3.1 Ontwerp-beginselen

De nieuwe *tweede trap van het indicatorensysteem waar het in deze notitie om gaat* is ontwikkeld om handvaten voor waterbeheerders te bieden wanneer zij wat betreft chemische verontreinigingen in een watersysteemanalyse herstelmaatregelen zouden moeten prioriteren. Het is voor de verbetering van de waterkwaliteit bijvoorbeeld zinniger om maatregelen te nemen voor een waterlichaam met 10 stoffen die 42% toxische druk opleveren (42% van de soorten blootgesteld boven hun 50%-effect niveau, dus: fikse effecten op veel soorten) dan op een waterlichaam met 1 stof net boven de norm (en bijvoorbeeld 6% van de soorten blootgesteld boven hun geen-effect niveau, dus: een mogelijke hinder bij een laag aantal soorten).

De tweede trap is ontworpen met de KRW als uitgangspunt, inclusief (dus) door aan te sluiten op de principes die ook gehanteerd zijn bij de normstelling voor stoffen. De tweede trap combineert de principes van de normstelling (geen effect en bescherming) en de mate van impact die besloten zit in de ecologische toestandsklassen (effect en herstel). Anders gezegd: de tweede trap bestaat uit vijf klassen die gebaseerd zijn op principes uit de toegepaste ecotoxicologie, gekoppeld aan de principes van de toegepaste ecologie, en bewerkt tot een indicatorensysteem dat aansluit op de KRW en in de praktijk hanteerbaar en betekenisvol is:

- Gebruikelijke eerste trap: toetsing van stoffen aan hun MKN, constatering of er wel of niet sprake is van afdoende bescherming per stof
- Nieuwe tweede trap: vaststelling van de toxische druk van lokale mengsels en rangordening van de resultaten, constatering met welke prioriteit, voor welke locaties en/of stofgroepen en/of stoffen er maatregelen nodig zijn voor herstel naar (tenminste) een goede ecologische toestand

Een belangrijk ontwerpbeginnsel voor het totale indicatorensysteem (1^e en 2^e trap) is dat de indeling in de klassen, bij de aanwezige diversiteit aan verontreinigingen, dus een indeling oplevert waarmee daadwerkelijk geprioriteerd kan worden en die daarnaast ook gevoelig is voor daadwerkelijke verbetering of verslechtering ten aanzien van de mate van belemmering door toxiciteit. Niemand heeft



iets aan een indicatorensysteem dat zo gevoelig is dat alles “rood” is, of bij wezenlijke verbeteringen in de ecologie “rood blijft”. Dit praktijk-principe is ooit gedefinieerd door het kabinet Balkenende-I, als verplichte praktijktoets voor beleidsvoornemens. De toetsing is bekend als “Beleids Effecten Toets” (BET).

In de twee volgende paragrafen worden voor de beschrijving en indeling van de vijfklassen-systematiek voor chemische verontreiniging eerst de woordelijke definities gegeven, en worden daarna de voorgestelde operationele grenswaarden beschreven.

2.3.2 Definities en betekenis van vijf chemische verontreinigingsklassen

Effecten in de ecologie zijn vaak gradueel van aard, en zouden in principe vaak goed kunnen worden uitgedrukt op een schaal van 0 tot 1 of 0 tot 100%. In de praktijk van de beoordeling van de waterkwaliteit is het echter gangbaar om de kwantitatieve respons gegevens om zetten in klassen, waarbij elke klasse een definitie heeft, en een bijhorend handelingsperspectief. Dat principe geldt ook voor chemische verontreinigingen; de ‘Vader van de Toxicologie’, Paracelsus, deed hierover de beroemde uitspraak dat *“alles giftig is, maar het is de dosis (de concentratie) die bepaalt of een ding giftig of niet giftig werkt”*.

In woorden zijn de voorgestelde definities als volgt, in relatie tot de ecologische toestandsklassen (de vijf kleuren die in de KRW daarvoor gehanteerd worden).

Zeer goed-ecologie (blauw) en Geen- of verwaarloosbare mengsel toxische druk (blauw):

- De zeer goede ecologische toestand duidt op de situatie dat alle biologische kwaliteitselementen (BKE's, dat zijn de diverse soortgroepen in de aquatische levensgemeenschap) aanwezig zijn in watertype-specifieke referentiecondities, terwijl alle drukfactoren (alle hydromorfologische en fysisch-chemische, inclusief chemische verontreinigingen) niet of zeer minimaal door mensen zijn beïnvloed.
- Het handelingsperspectief is: voorkom achteruitgang bij dreigende verstoring, en bescherm de situatie tegen achteruitgang.
- Als vergelijking: het alcoholpromillage van een chauffeur is nihil.

Goed-ecologie (groen) & Geringe mengsel toxische druk (groen):

- De goede ecologische toestand duidt op de situatie dat de BKE's nog niet significant afwijken van de watertype-specifiek referentiecondities, maar dat er wel sprake is van menselijke invloeden op (verhoging of verlaging van) één of meer drukfactoren.
- Het handelingsperspectief is: voorkom achteruitgang bij dreigende verstoring, met iets meer noodzaak dan bij zeer goede toestand (er is immers al invloed, maar nog (net) niet significant qua effecten).
- Als vergelijking: het alcoholpromillage is door het drinken van 1/10^{de} glas alcohol verhoogd, maar er zijn geen maatregelen nodig (de alcohol heeft eigenlijk nog geen ongewenst effect op de rijvaardigheid van een chauffeur).

Matig-ecologie (geel) & Matige mengsel toxische druk (geel):

- De matige ecologische toestand duidt op de situatie dat er significante maar matige effecten bestaan op de BKE('s) ten opzichte van de watertype-specifieke referentiecondities en ook op menselijke invloed(en) van hydromorfologische- en/of fysisch-chemische aard (inclusief chemische verontreinigingen).
- Het handelingsperspectief is: de waterbeheerder begint hierbij eerst met het diagnosticeren van de drukfactor(en) die het effect zouden kunnen veroorzaken, gevolgd door het kiezen en prioriteren van maatregelen die het effect veroorzaken (hoe groter het effect hoe krachtiger de maatregel).



- Als vergelijking: het alcoholpromillage is door het drinken van enkele glazen bier verhoogd, en de chauffeur is aangeschoten, en mag niet rijden.

Ontoereikend-ecologie (oranje) & Hoge toxische druk (oranje):

- De ontoereikende ecologische toestand duidt op de situatie dat er middelmatig verhoogde en significante effecten bestaan op de BKE('s) ten opzichte van de watertype-specifieke referentiecondities en ook op menselijke invloed(en) van hydromorfologische- en/of fysisch-chemische aard (inclusief chemische verontreinigingen).
- Het handelingsperspectief is als bij de matige toestand, maar met hogere prioriteit vanwege de grotere effecten.
- Als vergelijking: het alcoholpromillage is door het drinken van een flinke combinatie van alcoholica behoorlijk verhoogd, en de chauffeur is stomdronken en kan absoluut niet veilig rijden.

Slecht-ecologie (rood) en Zeer hoge toxische druk (rood):

- De slechte ecologische toestand duidt op de situatie dat er sterk verhoogde effecten bestaan op de BKE('s) ten opzichte van de watertype-specifieke referentiecondities en ook op menselijke invloed(en) van hydromorfologische- en/of fysisch-chemische aard (inclusief chemische verontreinigingen).
- Het handelingsperspectief is als bij de matige en ontoereikende toestand, maar met nog hogere prioriteit vanwege de grotere effecten.
- Als vergelijking: het alcoholpromillage is door het drinken veel alcoholhoudende dranken hoog, en de chauffeur is niet in staat tot bewust handelen en heeft verschijnselen van een alcoholvergiftiging.

2.4 Grenswaarden tussen de chemische verontreinigingsklassen

Voor chemische verontreiniging kan dit vijfklassen-systeem worden overgenomen, omdat ook voor toxiciteit geldt dat hogere blootstellingen, aan meer stoffen, en aan stoffen met een hogere toxiciteit, leidt tot steeds grotere effecten.

Bij vijf klassen zijn vier grenswaarden nodig om de klassen te onderscheiden. Bij het afleiden van de grenswaarden voor chemische verontreinigingen zijn enerzijds de principes van de normstelling voor toxische stoffen gevolgd, zodat er klassen zijn die aansluiten op het KRW-beschermdoel en de beschermende normen voor stoffen (voor de klassen zeer goed, en goed), en zijn vervolgens de principes van de ecologische toestandsklassen gevolgd waarin er effecten waargenomen zijn (matig, ontoereikend en slecht), zodat er klassen zijn die aansluiten op het KRW-impact- en herstel bereik.

Er zijn twee – gerelateerde – vormen van onderbouwing van de klassegrenzen, te weten:

1. Bij gebruik van het Chemie-spoor, zodat de klassegrenzen gedefinieerd worden via het begrip Potentieel Aangetaste Fractie (PAF) en meer-stoffen PAF (msPAF), wanneer dat afgeleid wordt van de concentraties van stoffen in een mengsel. Hulpmiddel bij deze indeling is de rekentool van het Chemie-spoor van de sleutelfactor Toxiciteit.
2. Bij gebruik van het Toxicologie-spoor, zodat de klassegrenzen gedefinieerd worden via het begrip Effect Signaal Waarde (ESW) en de omvang van waargenomen effecten, wanneer bioassay-waarnemingen worden gedaan aan de mengsels die aanwezig zijn in veldmonsters.

Noot: Ook voor de zuiveringsinspanning voor de drinkwaterproductie is een vijfklassen-systeem ontwikkeld. Dit wordt uiteengezet in een Deltafact (Posthuma et al., 2021a).



2.4.1 Toxische druk van mengsels (msPAF) en ecologische toestand

De belangrijkste grenswaarde voor de praktijk van het waterbeheer is de grens tussen goed en matig (dat is: tussen beschermende maatregelen en herstelmaatregelen). Het is dus belangrijk, dat vooral die grenswaarde strookt met enerzijds de uitgangspunten van het beleid, en anderzijds de stand van de kennis.

Het beleidsuitgangspunt voor elke drukfactor, en dus ook voor toxische stoffen, is dat er bij een zeer goede of goede ecologische toestand geen effecten optreden. Voor stoffen wordt daarbij het normenkader gebruikt. De milieu kwaliteits norm (MKN) van een stof geeft namelijk, per definitie, de bovengrens aan van concentraties waarbij nog sprake is van voldoende bescherming. Concentraties onder norm zijn voldoende beschermend, erboven niet (met gevolgen voor mogelijk de mens, ecosystemen via directe blootstelling, of ecosystemen via doorvergiftiging). Het is dan ook beleidsmatig logisch en consistent om de klassengrens voor chemische verontreiniging met mengsels in de tweede trap van het nieuwe indicatorensysteem op de beginselen van de normstelling te baseren.

Dit is mogelijk, vanwege de historische achtergronden van die normstelling. Historisch (de tachtiger jaren van de vorige eeuw) is het beleidsmatige beschermdoel voor toxische stoffen ooit gedefinieerd als *‘volledige structurele en functionele bescherming van het ecosysteem’*. Dat moest, door toepassing van methodieken uit de ecotoxicologie, operationeel gemaakt worden met een (toentertijd ontworpen) indicatorensysteem: een maatlat, en een maatstreep. Aan het eind van de tachtiger jaren is daarvoor het begrip ‘95%-beschermingsniveau’ gemunt. Dat wil zeggen, dat het toenmalige beleidsmatige begrip ‘maximaal toelaatbaar risiconiveau’ (MTR) gelijk gesteld werd aan het 5^e percentiel van een serie geen-effect waarden, zoals die verzameld konden worden voor een serie organismen na blootstelling aan een stof. Daarbij bleek *“All animals are unequal”*: elke soort heeft een eigen gevoeligheid (bijvoorbeeld: insecten zijn gevoelig voor insecticiden, andere taxonomische groepen minder of niet, en elk insect heeft een iets andere gevoeligheid voor dezelfde stof).

Bij de waarneming dat alle soorten een verschillende gevoeligheid voor elke stof hebben is toen ook waargenomen, dat de beschikbare gegevens de uit de statistiek bekende klokvormige verdeling volgden, en dat je (dus) met statistische werkwijzen percentielen kon afleiden, bijvoorbeeld: een laag percentiel, dat een beschermende concentratie zou weergeven. Voor het (toenmalige beleidsmatige) MTR is het 5^e percentiel gekozen van de verdeling van geen-effect waarden uit de gegevens van de verzameling toxiciteitstoetsen met een stof. De technische term daarbij was NOEC, de No Observed Effect Concentration. Uit dit 5^e percentiel van de NOEC-verdeling werd het voorstel voor het MTR afgeleid, de concentratie van een stof die bij 5% van de soorten zou leiden tot overschrijding van het geen-effect niveau, en is (dus) de eerdergenoemde 95% van de soorten beschermd tegen directe effecten op eindpunten zoals groei en reproductie.

Als we dit onderbouwende, historische principe omgekeerd interpreteren leggen we de basis voor de groen-geel klassengrens, als volgt. Het 5^e percentiel is namelijk bij de omgekeerde interpretatie dus *de geschatte geen-effect concentratie waarbij 95% van de soorten geen enkel effect ondervindt* van directe blootstelling. Bij 5% van de soorten zou deze blootstelling “het begin van enige hinder” aanduiden (dus zeker niet: verdwijnen van een soort, of zoiets). Hierover werd consensus bereikt: *het 95%-beschermingsniveau (wetenschap) is een goede operationalisatie van het beschermdoel (‘volledige bescherming van structuur en functie’)*. De consensus werd ondersteund door uitgevoerde validatiestudies: die toonden, dat er bij het MTR geen effecten werden waargenomen¹. Een

¹ Noot: het is belangrijk om breder te kijken. Deze uitspraak geldt voor stoffen en hun directe effecten op eindpunten zoals groei en reproductie. Voor stoffen die werken via bijvoorbeeld hormoonverstoring is de situatie uiteraard anders: die veroorzaken bij veel lagere concentraties heel specifieke typen van effect.



belangrijke, recente validatiestudie – heel verrassend – dat 97,3% van de soorten inderdaad geen effect (op hun dichtheid) vertoont bij deze blootstelling (Posthuma and Slootweg, 2021)!

Deze achtergrond leidt logischerwijs direct naar een beleidsmatig met het stoffenbeleid (bescherming) consistente definitie van de bedoelde grenswaarde tussen goed en matig. Het 95%-beschermingsniveau is – via bestaande kennis over mengsels – namelijk direct toe te passen op de uitkomsten van het Chemie-spoor van de ecologische sleutel factor toxiciteit. De bovengrens van de goede toestand – in de ecologie gedefinieerd door afwezigheid van significante effecten ten opzichte van de referentie – is voor stoffen en mengsels het 95%-beschermingscriterium.

Omdat de toepassing van de rekentool van het Chemie-spoor de toxische druk (van stoffen of mengsels) kwantificeert als PAF- of msPAF waarden, kan de bovengrens van de goede ecologische toestand qua chemische verontreiniging gedefinieerd door een (mengsel)toxische druk van maximaal 5% bij afleiding op basis van geen-effect data. In technische formule:

- De bovengrens ‘goed’ wordt gegeven door **msPAF-NOEC=5% (dat is: 0,05 indien uitgedrukt als fractie)**

Hierbij wordt dan het woord ‘geringe toxiciteit’ gebruikt als karakterisatie; dat duidt er op, dat er bij deze waarde wel stoffen aanwezig zijn, maar dat ze nog geen significant effect opleveren. Net als het drinken van 1/10^{de} glas alcohol.

De twee andere duidelijke grenzen worden afgeleid van de mate van effect in aquatische ecosystemen, zoals bij de matige, ontoereikende en slechte ecologische toestand. In de toegepaste ecologie zijn er voor de KRW toestandsklassen een aantal werkwijzen geëvalueerd, waarbij bijvoorbeeld geprobeerd werd om de woordelijke definities te koppelen aan gradaties van effecten op de BKE’s. Ook zijn er statistische technieken gebruikt, of is het eenvoudige principe toegepast van het gebruiken van drie gelijke effect-delen (dus bv. 0-1/3^{de}, 1/3^{de} tot 2/3^{de} en 2/3^{de} tot 1 als klassen met mate van impact).

Ecotoxicologische studies hebben de volgende grenswaarden opgeleverd:

- De **bovengrens van de chemische verontreinigingsklasse ‘matig’ (verontreinigd)** wordt gegeven door een blootstelling die bij maximaal 1 op 200 soorten een dichtheidseffect zou opleveren, ofwel in formule:
 - o msPAF-EC50 (maximaal) = 0,005 (uitgedrukt als fractie)
 Hier spreken we van matige toxiciteit (een matige belemmering voor het herstel naar een goede ecologische toestand).
- De **bovengrens van de chemische verontreinigingsklasse ‘hoog’ (hoge toxische druk)** wordt gegeven door een blootstelling die bij meer dan 1 op 200 maar minder dan 1 op 10 soorten een fiks effect zou opleveren, ofwel in formule:
 - o $0,005 < \text{msPAF-EC50} < 0,1$
 Hier spreken we van hoge toxische druk (een sterke belemmering voor het herstel naar een goede ecologische toestand)
- Bij hogere blootstelling, dus de **chemische verontreinigingsklasse ‘zeer hoog’ (toxische druk)**, zijn meer dan 1 op 10 soorten blootgesteld boven hun 50%-effect niveau, ofwel in formule:
 - o msPAF-EC50 > 0,1.

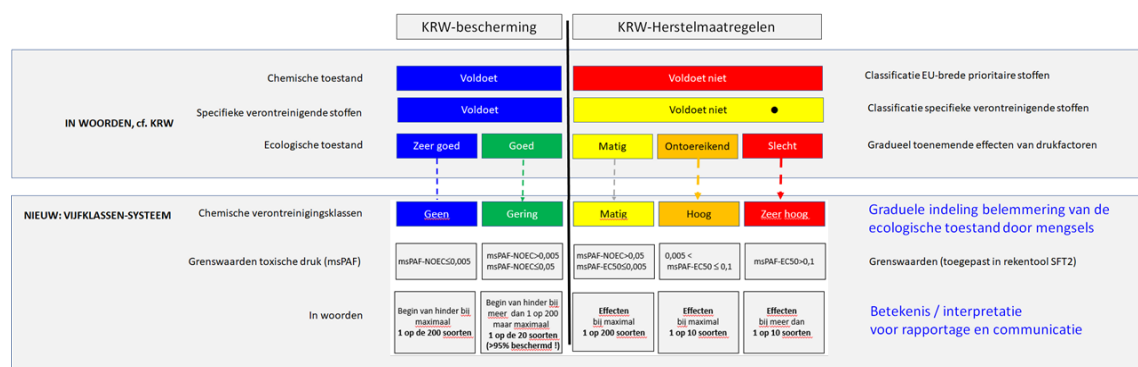


In het voorgaande zijn nu vier klassen gedefinieerd, namelijk via de bovengrenzen van groen, geel en oranje (waardoor de klasse ‘rood’ automatisch bekend is). De grens die nog ontbreekt is die tussen zeer goede en goede ecologische toestand (blauw en groen).

Deze kan op pragmatische gronden afgeleid worden, of eenvoudigweg niet gegeven worden. De inhoudelijke definitie van de zeer goede toestand stelt immers, dat er geen menselijke invloeden zijn, zodat de concentraties van de aanwezige stoffen gelijk zouden moeten zijn aan de natuurlijk aanwezige concentratie in een gebied (voor synthetische stoffen dus: nihil), en de door menselijk handelen veroorzaakte toxische druk (msPAF-NOEC) dus nihil zou moeten zijn.

Een andere werkwijze is, om een pragmatisch onderscheid tussen zeer goed en goed te benoemen, als (bijvoorbeeld) een gekozen lage grenswaarde voor de bovengrens van de zeer goede toestand. Hier wordt voorgesteld om als pragmatische waarde te kiezen een msPAF-NOEC waarde van $1/10^{\text{de}}$ van de bovengrens van goed. Die bovengrens van goed (95%-beschermingscriterium) betekent dat 5% ofwel 1 op 20 soorten is blootgesteld op het geen-effect niveau. De bovengrens van zeer goed zou dan 1 op 200 soorten zijn, ofwel msPAF-NOEC = 0,005. Het maken van de keuze van de grenswaarde tussen deze twee klassen dient echter nauwelijks een doel bij het waterbeheer: het handelingsperspectief voor de waterbeheerder is in beide klassen bescherming, en het behoud van de (zeer) goede toestand.

De vijf klassen, hun definitie, het handelingsperspectief, en de grenswaarden worden samengevat in Figuur 1.



Figuur 1. Samenvatting van de vijf klassen voor chemische verontreiniging, gedefinieerd de beginselen van de KRW en door kennis van principes achter de vaststelling van en de bekende waarden van de toxische druk en ecologische effecten. De grenswaarden tussen en definities van vijf klassen van chemische verontreiniging voor stoffen, stofgroepen en totale mengsels, zijn afgestemd op de principes die gehanteerd zijn om de ecologische toestandsklassen te definiëren. Bron: Postma et al. (2021) en Posthuma et al. (2016). Noot: de stippellijn rond de ecologische klasse ‘goed’ geeft aan dat de normen per stof uit de KRW als bovengrens ‘blauw’ hebben (geen verontreiniging, er zijn geen stoffen van aanwezig met een oorsprong vanuit menselijke activiteiten), terwijl de bovengrens voor mengsels in relatie tot de ecologische toestand de bovengrens van ‘groen’ hebben (mengsels vanuit die activiteiten zijn wel in geringe mate aanwezig, maar veroorzaken geen effect, wat identiek is aan de bovengrens ‘groen’ van de ecologische toestands-definitie

2.4.2 Praktijkbeoordeling van de voorgestelde indeling

Een goed indicatorensysteem moet ook ‘passen bij de bestaande situatie’ in Nederland, en er dus in dit geval betekenisvol aan kunnen bijdragen dat de praktijk van het waterkwaliteitsbeheer er door ondersteund wordt. Anders gezegd: als de Nederlandse watersystemen allemaal een msPAF-EC50



>0,1 zouden hebben, en dus in de klasse met zeer hoge toxische druk zouden vallen, dan zouden (net als nu, volgens de eerste trap via de MKN's) alle watersystemen op de lijst "maatregelen nodig" geplaatst worden. In dit hypothetische geval zouden er (dus weer) geen prioriteringen mogelijk zijn, terwijl het mogelijk maken van prioritering van maatregelen juist het oogmerk van het indicatorenstelsel is. In theorie is 'de beste verdeling' van de klassengrenzen dus een indeling die optimaal prioritering mogelijk maakt, en tevens gevoelig is voor verslechtingen of verbeteringen. In theorie is dat een verdeling waarbij elke klasse even vaak voorkomt, en de variatie in de huidige gradaties van vervuiling in Nederlandse watersystemen wordt meegenomen.

Om te evalueren of er sprake is van een potentieel goede set van klassengrenzen zijn de grenzen van Figuur 1 toegepast op de chemische verontreiniging van de Nederlandse oppervlaktewateren, op basis van monitoringdata uit de periode 2013-2018 (gegevens uit Postma et al. (2021)). Uit de resultaten blijkt, de indeling van Nederlandse oppervlaktewateren in deze klassen verschilt tussen stofgroepen. Ofwel, er is niet één set van klassengrenzen die een voor de praktijk altijd ideale verdeling is. De andere belangrijke waarneming is, dat de Nederlandse waterlichamen zich over de klassen verdelen, zodat de waterbeheerder met de huidige voorgestelde indeling kan prioriteren tussen locaties ("ergste eerst") en tussen stofgroepen ("meest toxische eerst"). Samengevat betekent dit dat er voor de Nederlandse oppervlaktewateren momenteel geen specifieke redenen zijn om de klassengrenzen anders te kiezen dan hierboven wordt voorgesteld.



Figuur 2. Analyse van de indeling van Nederlandse oppervlaktewateren in chemische verontreinigingsklassen voor mengsels (t.a.v. directe effecten van blootstelling aan mengsels op eindpunten zoals groei en reproductie van soorten) met de monitoringdata van Nederland, met data voor de periode 2013-2018. De indeling is gemaakt voor een aantal afzonderlijke stofgroepen (polycyclische aromatische koolwaterstoffen, PAKs, overige organische microverontreinigingen, OOMs, ammonium/ammoniak en metalen, en voor gegevens over de totale mengsels.

2.4.3 *Resposen in bioassays en de ecologische toestand*

De resultaten uit een inventarisatie van effecten die ooit in Nederlandse watersystemen bepaald zijn met bioassays en de effecten op de aquatische levensgemeenschappen zijn na afronding van deze KIWK-notitie verkregen. Ze zijn samengevat in het Deltafact over de klassen-indeling (Posthuma et al., 2021a).

2.5 *Chemische verontreinigingsklassen en zuiveringsinspanning*

De resultaten en onderzoek naar de opzet van een vijfklassensysteem voor de zuiveringsinspanning ten behoeve van de productie van drinkwater zijn na afronding van deze KIWK-notitie verkregen. Ze zijn samengevat in het Deltafact over de klassen-indeling (Posthuma et al., 2021a).

2.6 *Chemische verontreinigingsklassen en nieuwe inzichten*

Analyses op verschillende niveaus (nationaal, Europees, ecosysteem, en laboratorium) hebben laten zien dat de kans op grote ecologische effecten toeneemt naarmate de toxische druk (de msPAF-



waarde) toeneemt. Dit is een waarneming die afgeleid is uit de resultaten van studies met gecontroleerde blootstellingen aan stoffen en mengsels in mesocosms als uit de resultaten van analyses van monitoringdata. De voorlopige resultaten worden hier gerapporteerd, en betreffen een beperkt aantal studies.

Een groot aantal stoffen heeft specifieke directe effecten, die werken via verstoring van hormonen; hierbij hebben zeer lage concentraties soms een zeer groot effect. In de mesocosm-studies zijn verder waarnemingen gedaan die er op duiden dat er bij lage waarden van de toxische druk effecten zichtbaar worden. Die kunnen komen door een hoge blootstelling (hoge biobeschikbaarheid), een hoge gevoeligheid van sommige soorten, of indirecte effecten die ontstaan als cascade-effect (zie bijvoorbeeld alle studies uit Van den Berg et al. (2021)). Deze waarnemingen duiden er op dat het stellen van ecologische grenswaarden aan de hand van toxische druk waarden geen garantie is voor het altijd en overal uitblijven van effecten van chemische stoffen bij lage concentraties. Ondanks dit verschijnsel, waar waterbeheerders rekening mee moeten houden, biedt gebruik van de graduele toxische druk-maatlat, en de graduele bioassay-effecten, en de graduele verschillen in zuiveringsinspanning, de waterbeheerders wel een manier om locaties te prioriteren (een locatie met een hogere toxische druk heeft een hogere kans op grote ecologische effecten).

Kijken we naar de (verdere) toekomst, dan kunnen er meer inzichten ontstaan in de veld-betekenis van de beschermende grenswaarden, bijvoorbeeld: er kan blijken dat voor sommige stoffen en situaties er specifieke effecten van stoffen optreden onder de grens van $msPAF-NOEC=0,05$. Dit is zelfs goed denkbaar voor een aantal stoffen. Ook geldt, dat het nemen van maatregelen er toe zal leiden dat de druk van een aantal factoren op de aquatische ecosystemen aanzienlijk kan afnemen (bijvoorbeeld de druk van nutriënten, onnatuurlijke morfologie, en de meest schadelijke chemische stoffen). Dan wordt het indicatorensysteem, door het succes van de maatregelen, ongevoeliger. Net als de snelheidsmeter van een auto niet precies werkt bij 5, 10 of 15 km/uur. Vanwege dit soort effecten kan het goed zijn om de thans voorgestelde grenswaarden bij te stellen, aan de hand van nieuwe kennis, of aan de hand van het feit dat te zijner tijd een gevoeliger indicatorenmechanisme wenselijk is. Dat kan gerealiseerd worden door het bijstellen van de grenswaarden, maar ook door het instellen van meer grenzen. Overigens is het gebruik van klassen een 'handigheidje': de berekende toxische druk is altijd een getal tussen 0 en 1 (of 0 en 100%), en dit maakt rangordening tussen plekken en stoffen/stofgroepen inhoudelijk gezien mogelijk (met de berekende $msPAF$ -waarden als kwantitatieve basis voor rangordeningen, ook zonder de gegevens eerst in te delen in klassen via gekozen klassegrenzen).



3 Evaluatie en conclusies

Chemische verontreiniging is een complex verschijnsel, dat moeilijk te vatten is in een makkelijk hanteerbaar indicatorensysteem. Enerzijds is er een conceptueel sterk systeem, dat afgestemd is met het stoffenbeleid (zoals REACH), voor de overeenkomstige doelen van REACH en de KRW wat betreft bescherming: de normatieve beginselen die in REACH en de KRW worden gehanteerd voor het afleiden van beschermende normen zijn vrijwel gelijk. Dat is logisch als beleidsbeginsel, omdat het toelaten van stoffen (onder REACH) getoetst wordt aan hetzelfde beschermende beleidsbeginsel als het evalueren van de waterkwaliteit aan de hand van monitoringdata voor die stoffen. Voor een toegelaten stof wordt verwacht dat de norm niet zal worden overschreden, en zal uit monitoring naar verwachting blijken dat dit ook niet gebeurt.

Gebleken is echter, dat dit indicatorensysteem minder adequaat is bij de praktijkbeoordeling van chemische verontreiniging. De beoordeling met de normen duidt alleen op het onderscheid afdoende beschermd, of niet. Dit maakt prioritering van verontreinigingen, voor het prioriteren van maatregelen, niet mogelijk. De indeling in vijf klassen maakt dit wel mogelijk. De indeling in de vijf klassen houdt daarbij overigens dus direct rekening met een groter aantal stoffen, en met effecten van mengsels.

In deze notitie wordt een voorstel gedaan voor het eenduidig interpreteren aanpak voor het samenvatten van chemische verontreinigingsgegevens, door de verontreiniging in te delen in vijf klassen. Die hebben een betekenis, doordat ze relateren aan handelingsperspectieven (enerzijds: beschermen, of herstellen) en aan prioritering (wat eerst herstellen: welke locaties, en daarbinnen welke stofgroepen).

Het voorstel past bij de KRW, omdat Bijlage II (artikel 2.1.5) omschrijft dat waterbeheerders [vrij samengevat] de ‘...kans moeten beoordelen dat de KRW-doelen niet gehaald worden...’. Het begrip “kans” is een kwantitatief begrip, en de vijfklassen-indeling past hier goed bij als pragmatische rangordening van de kans dat chemische verontreinigingen de ecologische toestand belemmeren. Het bewijs dat een hogere toxische druk een hogere kans oplevert dat de ecologische toestand belemmerd wordt is in diverse studies beschreven (Posthuma and Slootweg, 2021; Posthuma et al., 2021b; Postma et al., 2021).

Datzelfde geldt voor de onderliggende gegevens over de toxiciteit van mengsels, die kwantitatief van aard zijn, en geschaald kunnen worden tussen 0 en 1. Voor het begrip toxische druk is die schaal een risico-schaal: de meest directe interpretatie van de toxische druk waarde is “de kans dat voor een willekeurig gekozen soort het gekozen eindpunt (NOEC, of EC50) wordt overschreden” (*Probability of Effects on a Species, PES*), wat uiteraard (bij blootstelling van soorten) de *Potentially Affected Fraction of Species* oplevert, en daaraan numeriek gelijk is.

De indeling in vijf klassen wordt in de KRW-literatuur over de ecologische toestand momenteel wel eens door ecologische experts benoemd als beperkend, dat wil zeggen: de experts vinden op basis van hun ervaringen met de vijfklassen-indeling dat een onderscheid in meer dan vijf klassen beter zou kunnen helpen bij het prioriteren van maatregelen, en bij het daadwerkelijk in het indicatorensysteem zichtbaar maken van succesvol herstel. Dit is geconstateerd, doordat ecologische waarnemingen regelmatig aantonen dat er daadwerkelijk herstel opgetreden is, terwijl de klassenindeling nog ongewijzigd bleef. Succesvolle maatregelen worden bij een ‘te krap’ indicatorensysteem (te weinig klassen, of te brede klassen bij een veel voorkomend niveau van effecten) ‘weg-gefilterd’, waardoor er de schijn ontstaat dat maatregelen geen zin hebben gehad. Dit effect speelt buitengewoon sterk bij de huidige twee klassen van chemische verontreiniging.



Als waterbeheerders scherp inzicht willen krijgen in effecten van maatregelen, dan kunnen de ruwe gegevens van de sleutel factor toxiciteit geïnterpreteerd worden. Immers, de klassen zijn daarvan een samenvatting.

Recente toepassingen van toxische druk bij de analyse van ruimtelijke en temporele trends in toxiciteit en de effecten ervan zijn te vinden in een tweetal STOWA-rapporten:

- Postma et al. (2021) analyseerde de monitoring-gegevens van chemische verontreinigingen in Nederlandse oppervlaktewateren, en deelde de resultaten in met behulp van de rekentool van het Chemie-spoor van de ecologische sleutelfactor Toxiciteit. Het rapport toont ruimtelijke verschillen in mengseltoxiciteit van alle gemeten stoffen (als totaalmengsels) binnen Nederland, maar ook dat de meest relevante stofgroepen regionaal verschillend zijn
- Hallmann and Jongejans (2021) analyseerde tijds-trends in de monitoring-gegevens van aquatische insecten, en gebruikte de toxische druk van bestrijdingsmiddelen als één van de factoren die de trends in de insecten mogelijk kon verklaren. Het rapport toont dat trends in de toxische druk van bestrijdingsmiddelen belangrijk zijn bij het herstel van de natuurlijke levensgemeenschappen.



Colofon

Deze notitie is geschreven in het kader van het project Toxiciteit van de Kennisimpuls Waterkwaliteit. In de Kennisimpuls werken Rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven en kennisinstituten aan meer inzicht in de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater en de factoren die deze kwaliteit beïnvloeden. Daarmee kunnen waterbeheerders en andere partijen de juiste maatregelen nemen om de waterkwaliteit te verbeteren en de biodiversiteit te vergroten.

In het programma brengen partijen bestaande en nieuwe kennis bijeen, en maken ze deze kennis (beter) toepasbaar voor de praktijk. Hiermee verstevigen ze de basis onder het waterkwaliteitsbeleid. Het programma is gestart in 2018 en duurt vier jaar. Het wordt gefinancierd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, STOWA, waterschappen, provincies en drinkwaterbedrijven.

Referenties

- Hallmann, C.A. and Jongejans, E. 2021 Long-term trends in aquatic insects in the Netherlands, STOWA rapport 2021-42, Amersfoort, nederland.
- Posthuma, L., De Zwart, D., Keijzers, R. and Postma, J. 2016 Ecologische Sleutelfactor Toxiciteit. Deel 2: Kalibratie: toxische druk en ecologische effecten op macrofauna <https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202016/STOWA%202016-15/STOWA%202016-15B.pdf>, STOWA, Amersfoort, the Netherlands.
- Posthuma, L. and Slootweg, J. 2021 Mengsel toxische druk en de mate van belemmering in aquatische ecosystemen uitgedrukt als tellingen van daadwerkelijke aantallen aangetaste soorten in het veld. Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit. Versie 1, 30 oktober 2021. . Kennis Impuls Water Kwaliteit (ed).
- Posthuma, L., Slootweg, J., Pronk, T., De Baat, M.L. and Van den Berg, S. 2021a Classificatie en communicatie van de graad van chemische verontreiniging. Deltafact. Versie 30 oktober 2021., STOWA, Amersfoort, the Netherlands.
- Posthuma, L., Van Driezum, I. and Pronk, T. 2021b Chemische verontreiniging en effecten op ecologie en de zuiveringsinspanning. Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit. Versie 1, 30 oktober 2021. . Kennis Impuls Water Kwaliteit (ed).
- Postma, J., Keijzers, R., Slootweg, J. and Posthuma, L. 2021 Toxiciteit van Nederlandse oppervlaktewateren in de periode 2013-2018, STOWA-rapport 2021-43, Amersfoort, the Netherlands.
- Van den Berg, S., Peng, F., Deneer, J., Posthuma, L., Slootweg, J. and Van den Brink, P. 2021 Validatie msPAF met behulp van resultaten semi-veld experimenten met afzonderlijke chemische stoffen en mengsels. Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit. Versie 1, 30 oktober 2021. . Kennis Impuls Water Kwaliteit (ed).

