



Routekaart

Actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing

‘Weten wat je moet en meten wat je doet’

Voorwoord

Waterkwaliteit. We raken er niet over uitgepraat. Want aan de vooravond van de deadline van de Kaderrichtlijn Water in 2027 is al duidelijk dat we de doelen niet gaan halen. En dat maakt ons onzeker. Krijgen we een herhaling van de stikstofcrisis maar dan op het thema water? Wat betekent dat voor Nederland?

Vanuit het TKI Watertechnologie zien we hier een kans. Een kans om gedetailleerd inzicht te krijgen in de actuele waterkwaliteit, waarmee een gefundeerd afwegingskader voor maatregelen ontstaat en waarmee we de effecten van maatregelen tijdig kunnen beoordelen.

Maar hoe genereren we tijdig data die geografisch nauwkeurig genoeg zijn? En hoe zorgen we ervoor dat die data verwerkt en verrijkt worden en aansluiten bij de wensen van de gebruikers en de beslissers? Daarvoor zien we nieuwe toepassingen van innovatieve technieken die ons kunnen helpen. Autonome robotica, artificiële intelligentie, edge computing en fotonica bijvoorbeeld. Laten we die technologie in Nederland inzetten en samen, op een gecoördineerde wijze, de sprong vooruit maken. Hoe dat kan? Dat leest u in deze routekaart.

Het is altijd weer indrukwekkend om te zien welke bijzonder gedegen kennis en brede informatie er beschikbaar komt als het bedrijfsleven, maatschappelijke organisaties en de wetenschap samenwerken. Ik wil graag mijn dank uitspreken aan iedereen die heeft meegewerkt aan deze routekaart.

Het zijn er simpelweg te veel om hier te benoemen, maar bij de 'Verantwoording' op pagina vijftig ziet u de namen en organisaties. Speciale dank aan Joep van den Broeke en Oscar van den Brink, die samen deze routekaart schreven. Ondanks de soms technische inhoud zijn zij erin geslaagd het toegankelijk te houden voor een zo breed mogelijk lezerspubliek.

En tot slot een uitnodiging aan u, beste lezer. We hebben onze uiterste best gedaan om alle inzichten hier voor u samen te brengen. We nodigen u uit om gezamenlijk en in goede onderlinge coördinatie de schouders eronder te zetten op weg naar actiegericht meten voor de waterkwaliteitsbeheersing.

Rob van Dongen
Voorzitter TKI Watertechnologie

Samenvatting

Goede waterkwaliteit is een cruciale pijler onder volksgezondheid, ecologische veerkracht en economische vitaliteit. Daarom wordt de waterkwaliteit al decennialang bewaakt en gemonitord. Dat gaat vaak gepaard met monsternamen en laboratoriumanalyse. Als gevolg van deze werkwijze is de informatievoorziening over waterkwaliteit veelal vertraagd en kunnen niet alle waterlichamen met hoge frequentie worden bemeaten. Met alleen al 750 oppervlaktewaterlichamen en 23 grondwaterlichamen is het periodiek meten en rapporteren een enorme opgave. Laat staan dat er fijnmazig (met een hoge geografische resolutie) kan worden gemeten. En dan zijn er ook nog de verschillende gebruikers van water, die moeten kunnen vertrouwen op de kwaliteit van het water dat zij innemen, bijvoorbeeld voor hun industriële processen of voor irrigatie. Tegelijkertijd hebben al deze gebruikersgroepen invloed op de kwaliteit van het oppervlakte-, grond- en uiteindelijk ook drinkwater.

Maatschappelijke, economische en innovatieve veranderingen, bijvoorbeeld ten behoeve van een grotere strategische autonomie van de EU, de energietransitie of circulaire economie, hebben extra dynamiek tot gevolg en maken het meten van waterkwaliteit ook in (en voor) de toekomst noodzakelijk.

Urgentie

Met de aanstaande deadline van de Kaderrichtlijn Water (KRW, 22 december 2027) kan zich een

scenario voordoen dat we herkennen van de stikstofcrisis: economische en maatschappelijke verlamming. Het Rapport Wennink noemt schoon water 'de crisis van de toekomst' en stelt dat de Kaderrichtlijn Water (KRW) de potentie heeft om de Nederlandse vergunningverlening (na de stikstofcrisis) nog verder op slot te zetten. Het belang van de beschikbaarheid van schoon water voor gebruik in verschillende sectoren wordt daarnaast breed onderkend. Dit maakt effectieve waterkwaliteitsbeheersing van groot belang. Op dit moment is er echter een sterke discrepantie tussen de hoeveelheid beschikbare data en snelheid van informatievoorziening enerzijds en de behoefte aan handelingsperspectief anderzijds.

Scope en oplossing

Een integraal systeem dat het proces van meten, dataverwerking en vertaling naar handelingsperspectief intensificeert en versnelt, moet deze discrepantie wegnemen. Snelle en fijnmazige monitoring helpt om afwijkingen in waterkwaliteit te detecteren, emissiebronnen te identificeren en de effectiviteit van interventies vast te stellen. Met behulp van de door hoogfrequente en fijnmazige metingen gegenereerde data kunnen *digital twins* en andere expertsystemen worden ontwikkeld die bij detectie van (te) hoge of zorgwekkende meetwaarden advies kunnen geven over mogelijke interventies. Door de juiste, gebruikersgerichte, vertaalslag te maken kunnen metingen worden omgezet in actie om de waterkwaliteit te beheersen. Ook maken gemeten data systeembegrip mogelijk, dat helpt om de lokale waterinname- en emissieruimte te verdelen, bijvoorbeeld bij vergunningverlening.

We kunnen meettechnologie misschien inkopen in andere (niet-Europese) landen, maar we weten ook dat dit ons afhankelijk maakt. Daarnaast is een gedeelte van wat ervoor nodig is om snel metingen in actie om te zetten, ook in het buitenland niet beschikbaar. We hebben als waterland een kans om koploper te worden op het gebied van actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing. Daarvoor moet dan wel een aantal zaken goed worden geregeld.

De routekaart beschrijft wat er inhoudelijk voor nodig is om in deze behoefte te voorzien en moet helpen om een waterkwaliteitscrisis te voorkomen en de watersector strategisch weerbaar te maken. Vanwege de complexiteit van de waterwereld, het circulaire karakter van water en de gewenste efficiëntie is ervoor gekozen om de scope van deze routekaart niet te beperken tot oppervlakte- en grondwater, maar andere domeinen, waaronder drinkwater, mee te nemen.

De doelgroep van deze routekaart is daarmee ook zeer uitgebreid en omvat onder andere beleidsmakers, brancheorganisaties van water gebruikende bedrijven, ontwikkelaars van meettechnologie, leveranciers van zuiveringsoplossingen, natuurbeheerders, etc.

De routekaart moet het startpunt zijn van geïntensiverde en continue samenwerking en ontwikkeling van het multi- en interdisciplinaire veld van 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing' om oplossingen voor zowel de korte als de lange termijn te faciliteren.

Gebruikerswensen

Voor acceptatie van de technologie van actiegericht meten is het van belang dat bij de ontwikkeling al rekening wordt gehouden met de waarden van de gebruikers; dat wat zij belangrijk vinden. Voorbeelden daarvan zijn privacy, veiligheid van data en systeem, juistheid van de gegevens en autonomie. Het op de juiste wijze en tijdig betrekken van de eindgebruiker zorgt ervoor dat hieraan aandacht wordt besteed, het zorgt voor focus op het einddoel en het vergemakkelijkt keuzes in het ontwikkelproces. Publiek-private samenwerkingen, fieldlabs en proeftuinen zijn hierin instrumenteel.

Zulke samenwerkings- en interactievormen faciliteren ook onderzoek naar en ontwikkeling van het maatwerk dat nodig is voor de vertaling van meting naar actie in de verschillende gebruikersgroepen. Deze verschillen immers sterk in opleiding en achtergrond en dat stelt eisen aan de 'leesbaarheid' van de uitkomsten van metingen. Daarnaast moet in de vertaalslag naar handelingsperspectief ook rekening worden gehouden met het belang van de gebruiker van de meetresultaten en de mogelijkheid die de gebruiker heeft om een interventie te plegen. In dit verband is het aanbevelenswaardig om algemeen geaccepteerde (reken)eenheden voor de maatschappelijke waarde van de kwaliteit van ecosystemen, biodiversiteit en gezondheid te ontwikkelen.

Van meting naar informatie naar handeling

Systeembegrip, inclusief de relaties tussen chemische kwaliteit en ecologische kwaliteit, hydrologie en de

effectiviteit van interventies in verschillende omgevingen, vormt de basis van adviessystemen. Hiervoor is de centrale beschikbaarheid van data en daaruit afgeleide kennis essentieel. Dat daarbij rekening gehouden moet worden met verschillen in betrouwbaarheidsniveaus van de data, spreekt voor zich.

Een hieraan gerelateerd onderwerp is de beschikbaarheid van metadata en hoe daarvan gebruikge maakt wordt in *artificial intelligence* (AI) en *machine learning* voor waterkwaliteitsbeheersing. Dit onderwerp verdient wetenschappelijk onderzoek. De inzet van AI kan middels het genereren van hypotheses bijdragen aan het ontwikkelen van systeembegrip. Voorwaarde daarvoor is dat de kwaliteit van de gebruikte meetdata voldoende hoog is. De technologie kan ook worden ingezet in adviessystemen (*decision support systems*), bijvoorbeeld in de vorm van AI-agents in modulaire expertsystemen of ten behoeve van de vertaling van meetdata in begrijpelijke taal met behulp van generatieve AI.

Voor het verkrijgen van meetgegevens met voldoende snelheid, frequentie en geografische resolutie is vernieuwende meettechnologie nodig. Oplossingen kunnen worden gevonden in de ontwikkeling van *in situ* of drone-gedragen sensoren, maar ook in *remote sensing*. Bij de ontwikkeling van zulke technieken moet worden uitgegaan van het doel van de metingen. Gaat het om het meten van verschillen in concentraties of effecten, of gaat het om nauwkeurige bepaling van concentraties voor bijvoorbeeld rapportage, toezicht en handhaving? In het laatste geval moet de meettechnologie ook juridisch borgbaar zijn. Omdat veranderingen van inzichten en prioriteiten aanleiding kunnen geven tot

nieuwe meetwensen, is continue innovatie van meettechnologieën nodig voor de toekomstbestendigheid van waterkwaliteitsinformatiesystemen.

Integraliteit en programmamanagement

De routekaart laat zien dat voor de ontwikkeling van een goed informatiesysteem voor waterkwaliteitsbeheersing veel verschillende technologische en methodologische innovaties nodig zijn. Niet alles hoeft strikt binnen de context van de toepassing op waterkwaliteitsbeheersing te worden ontwikkeld. Afhankelijk van de benodigde innovatie of faciliteit kan dit voor verschillende elementen goed in gezamenlijkheid met andere applicatiegebieden gebeuren. Daarvoor is wel een krachtig programmanagement nodig. Het programmanagement dient nog een aantal andere doelen: het zorgt bijvoorbeeld voor tijdige interactie met applicatie-specifieke actoren, waaronder gebruikersgroepen, en voor integraliteit van het programma.

Deze routekaart laat zien wat er nodig is voor de ontwikkeling van actiegerichte waterkwaliteitsmeting om urgente en toekomstige uitdagingen op het gebied van waterkwaliteit het hoofd te bieden. Met de voorgestelde ontwikkelpaden kunnen waterkwaliteitsbeheerders, en andere spelers met een verantwoordelijkheid op dat gebied, weten wat ze moeten en meten wat het effect is van hun actie of interventie.

Leeswijzer

Deze routekaart geeft eerst een indruk van de situatie waarin we ons bevinden op het gebied van waterkwaliteit, door de aanleiding en urgentie van waterkwaliteitsbeheersing te schetsen en een indruk te geven van de complexiteit. Vervolgens worden in het derde en vierde hoofdstuk de cruciale rol van meettechnologieën voor waterkwaliteitsbeheersing belicht, inclusief de stand van zaken.

Uitgaande van de wensen die gebruikers van waterkwaliteitsmetingen hebben (hoofdstuk 5), wordt in het zesde hoofdstuk besproken welke innovatieroutes er zijn om in de behoeftes te kunnen voorzien. Het laatste hoofdstuk geeft een impressie van relevante bestaande innovatieprogramma's en innovatiegemeenschappen. Ook worden hier kort de internationale context van waterkwaliteitsbeheersing en het belang van de aansluiting met educatie behandeld.

Deze routekaart is geschreven voor een brede doelgroep. Hoewel wij onze best hebben gedaan om het voor iedereen begrijpelijk te houden, ontkomen we er niet aan om hier en daar in jargon en het gebruik van afkortingen te vervallen. Daarom maken we gebruik van voetnoten met uitleg en een lijst met begrippen en afkortingen die zich aan het eind van het document bevindt.



Foto: Oscar van den Brink

Inhoud

Voorwoord.....	2
Samenvatting	3
Leeswijzer	5
1 Aanleiding en urgentie	8
Aanleiding.....	8
Urgentie	8
Oplossingen	10
Impactambitie	10
2 Complexiteit rondom waterkwaliteit.....	12
Wat is waterkwaliteit?	12
De complexe waterwereld en voorwaarden voor effectief beheer.....	13
Verantwoordelijkheid van veel partijen	15
3 De rol van meten in waterkwaliteitsbeheersing	18
Systeembegrip	18
Bronidentificatie	18
Informeren en handelingsperspectief verschaffen	18
(Effect)monitoring	19
4 State of the art in metingen voor waterkwaliteitsbeheersing	20
De meting.....	20
Data-opslag en presentatie	22
Ontwikkelingen en trends	24
5 Gewenste uitkomsten van een programma ‘actiegericht meten’	27
Voorbeeld – Waterbeheer en Drinkwater.....	27
Voorbeeld – Land- en Tuinbouw.....	28
Voorbeeld – Industrie	28
Overkoepelende wensen	30
Gewenste outcomes innovatieprogramma	30

6 Uitwerking van de innovatieroutes	32
Waardengedreven systeemeisen.....	32
Stakeholder-inclusief innovatieproces	34
Van meting naar informatie naar actie – leesbaarheid en prikkels voor interventies	34
Meettechniek algemeen.....	36
Opkomende stoffen en stofgroepen.....	36
Meer dan chemische informatie.....	38
Schaal van de metingen.....	38
Multivariate data-analyse en Artificial Intelligence	38
Data-opslag, -toegang en informatieverwerking	40
Programmamanagement.....	41
7 Kennis- en innovatielandschap	43
Aansluiting met recente belangrijke strategiedocumenten	43
Bestaand actief nationaal innovatielandschap en bestaande programma's	45
Internationaal	47
Opleiding en training	47
Vervolg op deze routekaart	49
Verantwoording	50
Lijst van afkortingen en begrippen	51
Referenties	52
Colofon	54

Uitgelicht

Meerdere dagen water koken vanwege drinkwaterverontreiniging.	16
Waterverse faciliteert Europese dataspace voor waterkwaliteit	23
Tuinders willen sneller en meer inzicht in waterkwaliteit	29
Micro- en nanoplastics; een ‘nieuw’ soort vervuiling	37
Ondergrondse verzilting meten vanaf een helikopter	39

1 Aanleiding en urgentie

Aanleiding

Goede waterkwaliteit is een cruciale pijler onder volksgezondheid, ecologische veerkracht en economische vitaliteit. Voor huishoudens is schoon water vanzelfsprekend van levensbelang. Maar ook natuurlijke ecosystemen, industrie, landbouw en zorg zijn voor hun functioneren in hoge mate afhankelijk van betrouwbare en kwalitatief goede waterbronnen. Zo wordt water bijvoorbeeld gebruikt voor irrigatie van gewassen, als drinken voor vee, als ingrediënt of hulpstof in productieprocessen en voor koeling.

Tegelijkertijd hebben al deze gebruikersgroepen invloed op de kwaliteit van het oppervlakte-, grond- en uiteindelijk ook drinkwater. Afvalwater uit huishoudens en instellingen wordt ingezameld via de riolering, gezuiverd en teruggebracht in het watersysteem, waarbij verschillende reststoffen, zoals medicijnresten, een aandachtspunt vormen. Industriële processen leiden tot lozingen, en in de landbouw beïnvloeden bemesting en gewasbescherming de waterkwaliteit. Er is dus sprake van een sterke verwevenheid van belangen.

De implementatie van maatregelen ter verbetering van de strategische autonomie van Europa zal invloed hebben op het industriële landschap. En ook innovaties van de toekomst, bijvoorbeeld op het gebied van energietransitie, *artificial intelligence* en circulariteit zullen moeten kunnen beschikken over voldoende water van goede kwaliteit.

Waterkwaliteit is een dynamische ecologische, maatschappelijke en economische kwestie. Deze routekaart moet aanleiding geven tot continue samenwerking en ontwikkeling van het multi- en interdisciplinaire veld van actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing en oplossingen voor de korte én lange termijn te faciliteren.

Urgentie

Ter bescherming van de waterkwaliteit zijn verschillende richtlijnen van kracht. Voorbeelden van Europese richtlijnen zijn: de Drinkwaterrichtlijn, de Grondwaterrichtlijn, de Kaderrichtlijn Water (KRW), de Richtlijn prioritaire stoffen, de Richtlijn stedelijk afvalwater en de Zwemwaterrichtlijn. Deze richtlijnen zijn onder andere verankerd in de volgende Nederlandse wetten: Waterwet, Drinkwaterwet en Omgevingswet.

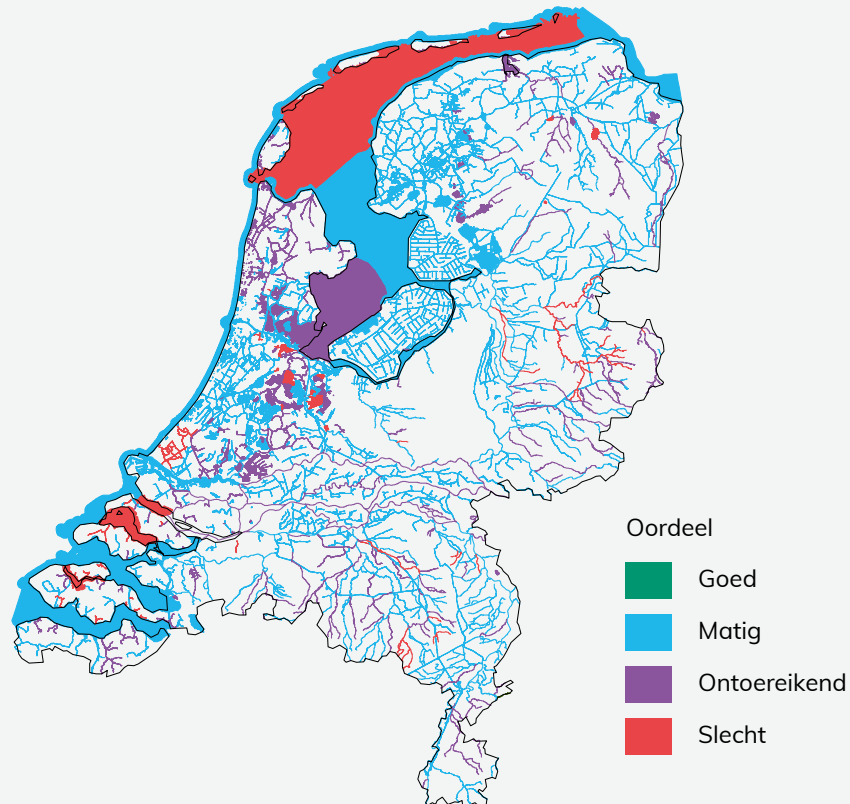
De KRW is van kracht sinds 2000 en stelt dat uiterlijk in **2027** alle oppervlaktewateren een goede ecologische en chemische toestand moeten bereiken, en de grondwaterlichamen een goede chemische en kwantitatieve toestand. In de meest recente rapportage van de Europese commissie over de implementatie van de KRW[1] wordt duidelijk dat slechts 39.5% van de oppervlaktewateren in de EU een goede ecologische status heeft, en slechts 26.8% een goede chemische status. Ten aanzien van de kwaliteit van de Nederlandse oppervlaktewateren is er sprake van een paradox: Nederland voldoet aan ongeveer 80% van de normen in de KRW, maar geen

van de 750 oppervlaktelichamen verkeert in een volgens de KRW 'goede toestand'. Dit is het gevolg van het zogenoemde *one-out-all-out* principe, dat vereist dat een waterlichaam op alle afzonderlijke chemische en ecologische parameters 'goed' scoort. Uit het Landelijk dashboard KRW-maatregelen 2024 [2] blijkt dat geen van de waterlichamen ecologisch 'goed' is en volgens de beoordeling van de chemische waterkwaliteit in 2024 [3] is slechts ~ 1% chemisch 'goed'. Van de 23 grondwaterlichamen voldoen er 4 aan de KRW.

Figuur 1 laat zien hoe het gesteld is met de ecologische en chemische kwaliteit van de Nederlandse oppervlaktewateren.

Het niet voldoen aan de KRW kan verstrekken gevolgen hebben. Naast de impliciete bedreiging van milieu- en volksgezondheid zijn er andere maatschappelijke, economische en juridische consequenties. Denk hierbij aan beperking van de economische groei, inbreukprocedures vanuit de EU, rechtszaken van belanghebbenden, saneringskosten, reputatieschade en verlies van vertrouwen, verscherping van vergunningen, toezicht en handhaving (VTH) en bedreiging van het vestigingsklimaat. Een soortgelijke situatie als met de stikstofcrisis kan zich voordoen, en mogelijk nog erger omdat water meer sectoren betreft. In het Rapport Wennink [4] wordt schoon water zelfs 'de crisis van de toekomst' genoemd. Het rapport noemt het versnellen en voorspelbaarder maken van vergunningverlening als een van de punten waarop op korte termijn actie moet worden ondernomen.

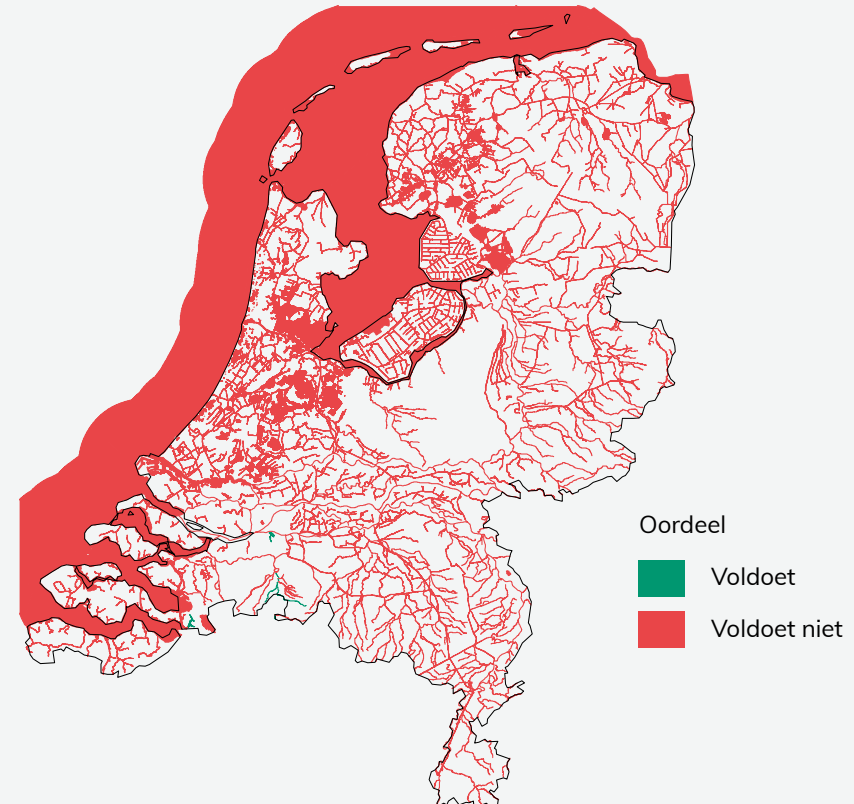
Beoordeling ecologische kwaliteit, Kaderrichtlijn Water, 2024



Bron: IHW (waterschappen, RWS), PBL
Bewerkt door TKI Watertechnologie

PBL/nov25
clo.nl/nl143810

Beoordeling chemische kwaliteit, Kaderrichtlijn Water, 2024



Bron: IHW (waterschappen, RWS), PBL
Bewerkt door TKI Watertechnologie

PBL/nov25
clo.nl/nl156606

Figuur 1 : Ecologische (links) en chemische (rechts) kwaliteit van Nederlandse oppervlaktewaterlichamen. In de kaart van de chemische waterkwaliteit wordt het niet voldoen (rood gekleurd) veroorzaakt doordat één of meerdere stoffen uit de lijst van 45 stoffen of stofgroepen die in heel Europa een probleem vormen de normen overschrijden. In 20% van de oppervlaktewateren overschrijden meer dan 5 stoffen de norm. [3]

Ook de andere genoemde richtlijnen stellen eisen aan waterkwaliteit. Zo eist de Richtlijn behandeling stedelijk afvalwater [5] bewaking van en communicatie over de kwaliteit van gezuiverd afvalwater. Het betreft hier voor milieu- en volksgezondheid relevante parameters. Verder moeten, afhankelijk van de toepassing of het punt van lozing van (stedelijk) afvalwater, (mogelijk) additionele parameters worden gemonitord, zoals het nutriëntengehalte, de aanwezigheid van antimicrobiële resistentie, het gehalte aan microplastics en het gehalte aan PFAS. Deadlines voor monitoring en gegevensverzameling die in deze richtlijn worden genoemd, liggen in 2030.

Voor het verbeteren van de kwaliteit van water zijn verschillende preventieve en curatieve interventies mogelijk. In de eerste plaats kunnen veranderingen in bedrijfsprocessen, consumptie en gedrag bijdragen aan verbetering van de waterkwaliteit. Daarnaast zijn er bestaande zuiveringsmethoden en zijn er innovatieve zuiveringsmethoden in de maak, die verontreinigingen kunnen verwijderen. Om een keuze te maken tussen dit soort handelingsopties is informatie nodig. Hier gaat het om vragen als 'welke verontreiniging moet aangepakt worden?', 'welke interventie-optie is in dit specifieke geval beter?' en 'wat gaat het effect van deze interventie dan zijn?'. De antwoorden op deze vragen bieden

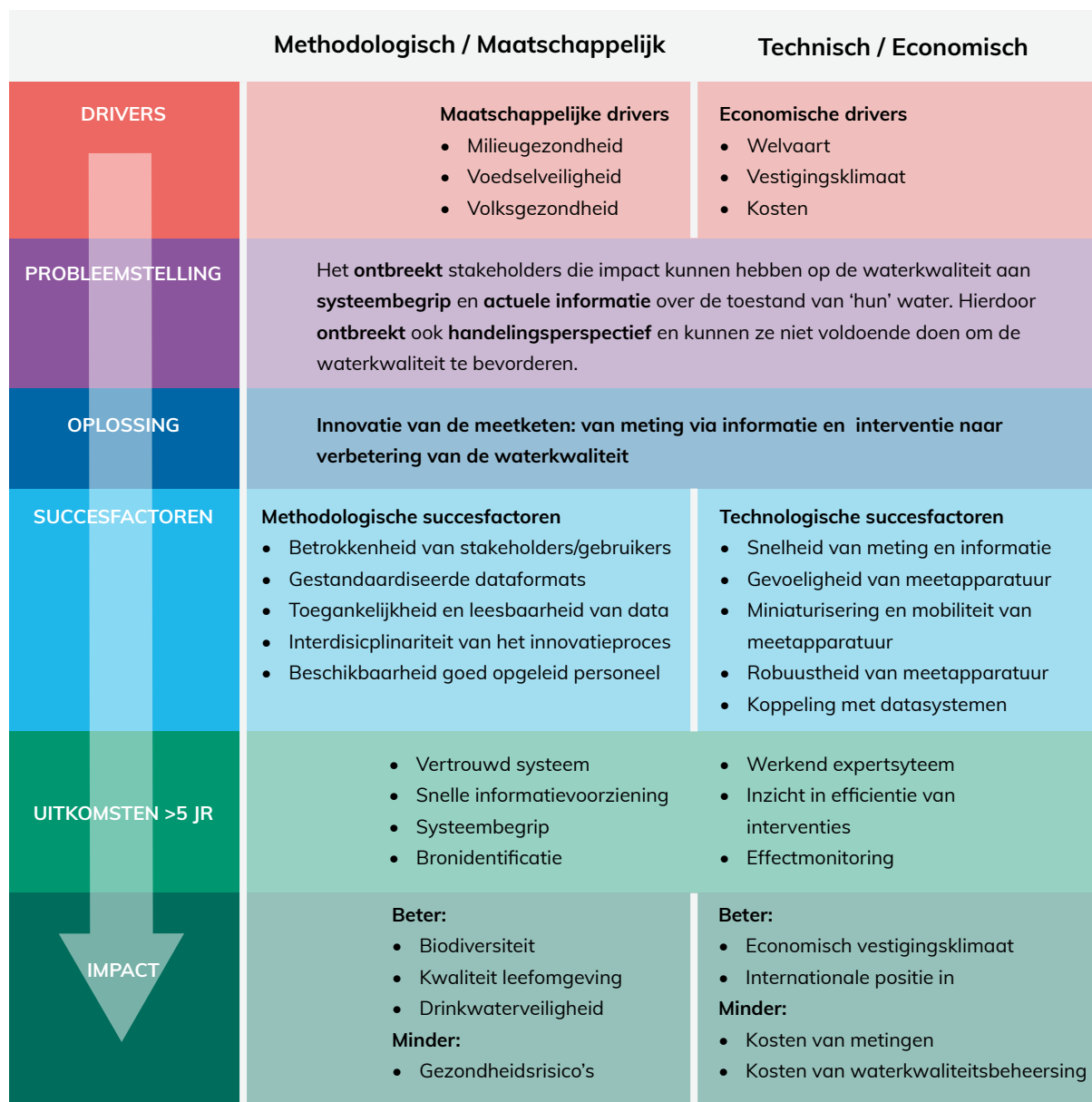
Om goede keuzes te kunnen maken moet worden voldaan aan een aantal technische en systeem-voorwaarden. Er moet een actueel overzicht van handelingsopties zijn, er moet systeembegrip zijn, de informatie die over de waterkwaliteit wordt verschaft moet betrouwbaar en actueel zijn en effecten van interventies op de waterkwaliteit moeten worden gemonitord. Hiervoor zijn betrouwbare en betaalbare metingen nodig die op verschillende plaatsen en tijdstippen kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast moet er een vertrouwd datasysteem zijn dat gekoppeld is met een *digital twin* of een ander expertsysteem en de metingen vertaalt naar begrijpbare informatie en adviezen.

Impactambitie

elementen van het missiegedreven innovatiebeleid moet dit leiden tot:

- Verbetering van de biodiversiteit (minder eutrofiëring, verbetering van het aquatisch milieu);
- Verbetering van het economisch vestigingsklimaat (vergunningsruimte, license to operate voor bedrijven);
- Verbetering van de leefomgeving (burgers zijn goed geïnformeerd over de kwaliteit van wateren);
- Veiligheid van drinkwater (chemisch en biologisch);
- Reductie van gezondheidsrisico's (minder gifstoffen in oppervlakte- en grondwater);
- Kostenreductie van metingen en waterkwaliteitsbeheersing (zowel economisch als qua materiaalgebruik en duurzaamheid, denk ook aan kostenvermindering van waterzuivering door bronaanpak);
- Verlaging van de arbeidsintensiviteit van het meten van waterkwaliteit;
- Een internationaal erkende en florerende water-technologiesector die wereldwijd waterkwaliteitsbeheersingsinnovaties verkoopt en slechts in geringe mate afhankelijk is van de beschikbaarheid van buitenlandse of niet-Europese apparatuur.

Routekaart Actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing



De routekaart is bedoeld voor iedereen die een rol heeft in de agendering, ontwikkeling, implementatie of gebruik van de in de routekaart beschreven innovaties.

Figuur 2 positioneert de thematiek van de routekaart tussen de economische en maatschappelijk drivers en de beoogde impact. Deze routekaart beschrijft wat er nodig is om de impact te bereiken en geeft aan waar (binnen de scope van de routekaart) de knelpunten zitten.

Figuur 2 : Positionering van de routekaart tussen de economische en maatschappelijk drivers en de beoogde impact. De routekaart beschrijft de probleemstelling tot en met de uitkomsten.

2 Complexiteit rondom waterkwaliteit

Wat is waterkwaliteit?

Het begrip waterkwaliteit is veelomvattend en afhankelijk van de functie en/of het gebruik van water. De kwaliteitsopgave voor oppervlaktewater is tweeledig: een goede ecologische kwaliteit en een goede chemische kwaliteit. In het geval van drinkwater gaat het om volksgezondheid en ligt de focus op toxische chemische stoffen en pathogenen. Bij zwemwater ligt de focus op ziekteverwekkers zoals intestinale enterokokken en E. coli. De grondwaterkwaliteit wordt afgelezen aan de concentratie van verontreinigingen en toxische stoffen en de onderliggende lijst overlapt gedeeltelijk met die voor de drinkwaterkwaliteit.

Tabel 1 geeft voorbeelden van de kwaliteitsparameters die worden gebruikt in de drinkwaterrichtlijn, de zwemwaterrichtlijn, de grondwaterrichtlijn, de richtlijn stedelijk afvalwater en de KRW (voor oppervlaktewater). In het geval van de laatste wordt een onderscheid gemaakt in de tijd. Veel parameters moeten in 2027 in orde zijn, andere per 2033 of 2039.

Inzicht in deze parameters, maar ook in de relaties daartussen is van cruciaal belang om de waterkwaliteit te beheersen. Zo zijn er relaties tussen chemische en ecologische parameters en daarnaast is er ook nog mogelijke afhankelijkheid van externe factoren, zoals regenval, (grond)waterstanden en overstromingen.

Tabel 1 : Parameters Waterkwaliteit			
Klasse	Oppervlaktewater [6][7]	Grondwater [8]	Drinkwater* [9]
Chemisch, anorganisch	2027: NH_4^+ , Cd, Hg, As, Ba, B, Co, Se, Tl, U, V, Ag, Zn 2033: Ni	As, Cd, Pb, Hg, NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , P/fosfaten	Sb, As, B, BrO_3^- , Cd, ClO_2^- , Cr, Cu, CN^- , F, Pb, Hg, Ni, NO_3^- , NO_2^- , Se, U
Chemisch, organisch	2027: 15 gewasbeschermingsmiddelen, Chryseen, Benzo(a)antracene 2033: PBDEs en 6 Andere industriële stoffen 2039: 3 gewasbeschermingsmiddelen, Dioxines, PFOS	Synthetische stoffen, Werkzame stoffen in gewasbeschermingsmiddelen, incl. hun relevante omzettings-, afbraak- en reactieproducten, Trichloorethyleen, Tetrachloorethyleen	Acrylamide, Benzeen, Benzo[a]pyreen, Bisfenol A, 1,2-Dichloorethaan, Epichloorhydrine, Gehalogeneerde azijnzuren, Microcystine-LR, N-nitrosodimethylamine, PAK's, PCB's, Pesticiden, PFAS, Tetra- en trichlooretheen, Trihalomethanen, Vinylchloride
Biologisch	Voor zwemwater: Intestinale enterokokken, Escherichia coli,		Intestinale enterokokken, Escherichia coli, Bacteriofagen
(Eco) indicator	Zuurstofgehalte, nutriëntengehalte (overlap met chemisch), pH, doorzicht, temperatuur, chlorofyl-a concentratie, soortensamenstelling van vissen, fytoplankton en waterplanten, abundantie van verschillende groeivormen van waterplanten en van positieve en negatieve soorten in macrofauna, en migratie-mogelijkheden van vissen	Elektrisch geleidingsvermogen, pH, Zuurstofgehalte, NO_3^- , NH_4^+	kleur, geur, smaak, troebelheid, Al, Fe, Mn, Na, SO_4^{2-} , Zn, radioactiviteit (tritium, radon, indicatieve dosis)

* Hierbij zijn de Signaleringsparameters (10) en Bedrijfstechnische parameters (15) die in de drinkwaterwet gespecificeerd worden, niet meegenomen.

Voor bedrijven met milieubelastende activiteiten die lozen op riool of oppervlaktewater gelden vergunningsafspraken. Daarin staat welke stoffen er in welke concentraties mogen worden geloosd op riolen of oppervlaktewateren. De in vergunningen genoemde stoffen verschillen doordat ze afhangen van de activiteiten van de bedrijven. Naast de in diverse richtlijnen bedoelde stoffen komen in de vergunningen vaak nog (andere) (potentieel) zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) voor. Voorbeelden zijn butadieen, acrylonitril en glutaraaldehyde. Hiermee zijn concentraties van vergunningsstoffen ook belangrijke waterkwaliteitsparameters.

Naast de in Tabel 1 benoemde parameters is er in toenemende mate aandacht voor stoffen die worden toegepast vanwege hun bioactiviteit. Een aantal gewasbeschermingsmiddelen is bijvoorbeeld in de KRW opgenomen op de lijst prioritair stoffen die vanuit 2027 moeten worden gemonitord. Maar ook stoffen voor humaan gebruik, in het bijzonder geneesmiddelen en metabolieten daarvan (ook bekend als medicijnresten), liggen onder de loep omdat ze mogelijk effecten hebben op de ecologische waterkwaliteit. Een voorbeeld is hormoonverstoring bij vissen door geslachtshormonen uit humane anticonceptiva. Het rapport 'Geneesmiddelen en waterkwaliteit' [10] van het RIVM geeft een overzicht van de problematiek. In het platform Kennisnetwerk Medicijnresten¹ werken betrokken stakeholders en andere geïnteresseerden samen om op dit gebied kennis te vergroten en informatie te delen. Eenzelfde uitdaging is er voor

productgroepen zoals diergeneesmiddelen, biociden en consumentenproducten, die allemaal na gebruik (deels) hun weg naar het watermilieu vinden.²

De complexe waterwereld en voorwaarden voor effectief beheer

Zoals hierboven aangegeven, is de impactdoelstelling van de routekaart om de waterkwaliteit en waterkwaliteitsbeheersing sterk te verbeteren. Dit vereist diepgaande kennis van de dynamiek en interacties in het complexe watersysteem. Er is sprake van een verwevenheid van belangen en effecten, zo is er een directe relatie tussen verschillende waterstromen; drinkwater wordt gewonnen uit oppervlaktewater en uit grondwater. Drinkwater wordt door gebruik deels omgezet in afvalwater dat na reiniging wordt geloosd op oppervlaktewater. Regen- en irrigatiewater stroomt af van landbouwgronden en andere oppervlakken en komt in oppervlaktewater en de riolering terecht, maar infiltreert ook via de bodem naar het grondwater. Figuur 3 geeft de volumina van de gebruiksstromen vanuit en naar de verschillende compartimenten weer.

Deze complexiteit maakt effectief ingrijpen ten behoeve van de kwaliteit van water een bijzondere uitdaging. In de eerste plaats is identificatie van de aard van een verontreiniging of verstoring essentieel. Betreft het een verandering in de biologie van het water, een verontreiniging door deeltjes of een chemische verontreiniging en gaat het dan om een of meerdere stoffen of entiteiten? In het geval van

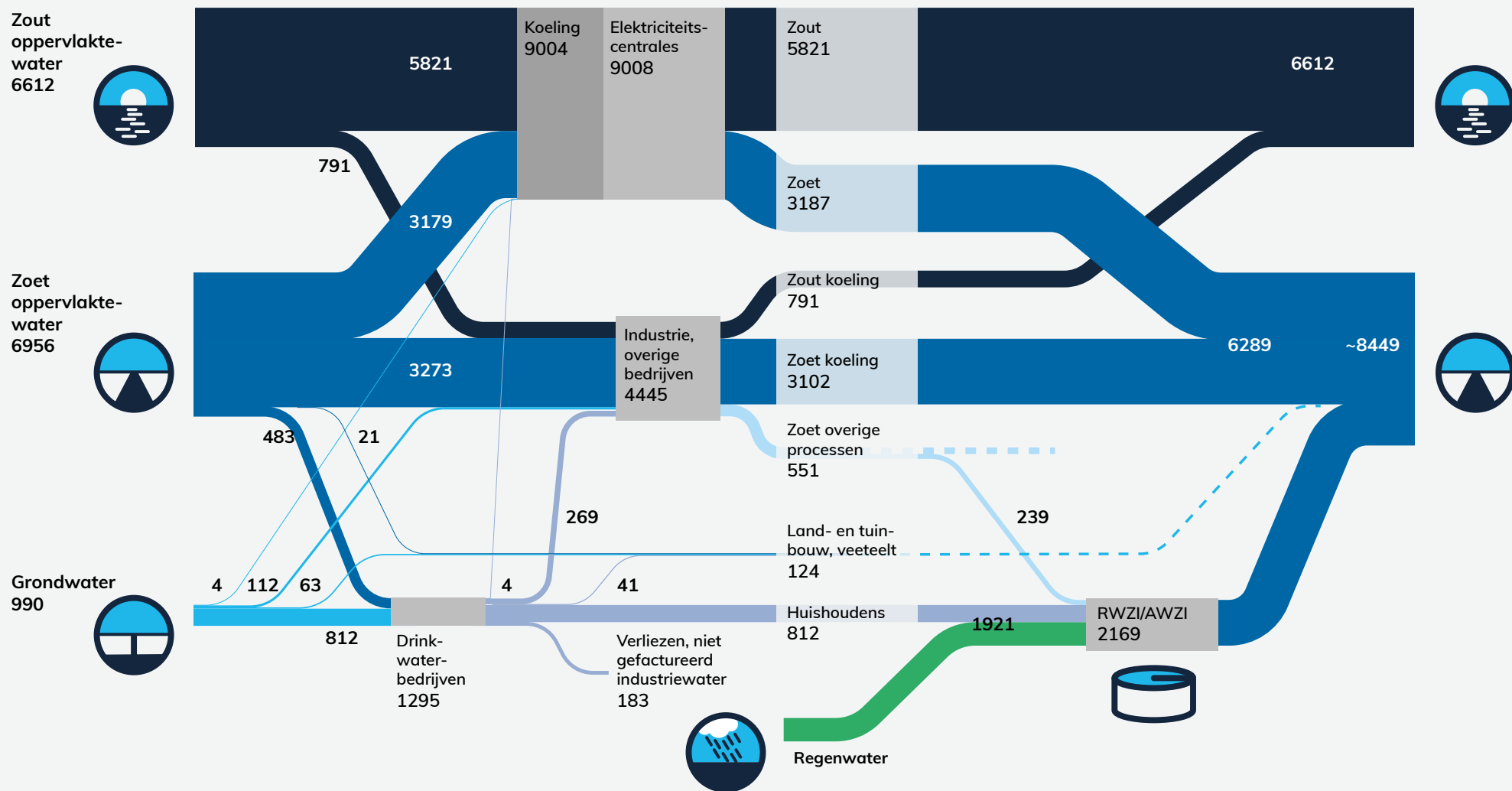
drinkwaterwinning uit oppervlaktewater bijvoorbeeld, zijn de vragen 'is de verontreiniging eerder gezien?', 'is de verontreiniging geïdentificeerd?' en 'is de concentratie bekend?' belangrijk. Dit omdat daarmee iets kan worden gezegd over de noodzaak van een innamestop.

In de tweede plaats is de bron van de verstoring of verontreiniging belangrijk. Gaat het om een nabije puntemissie, komt de verontreiniging uit een ander waterlichaam, is deze natuurlijk, historisch of van recente of actuele antropogene oorsprong, is de verontreiniging of verstoring ook elders gezien? De zoektocht naar de bron van verontreinigingen speelt ook een belangrijke rol in de kwaliteitsbeheersing van drinkwater. De kadertekst over een recente drinkwaterverontreiniging in de regio Utrecht gaat daar dieper op in.

Ten derde is het van belang keuze te kunnen maken tussen verschillende preventieve en curatieve interventies. Een niveau dieper is er behoefte aan inzicht ten aanzien van de effectiviteit van interventies voor specifieke situaties. De wederkerigheid in de relatie tussen metingen enerzijds en interventies anderzijds is een van de kernpunten van deze routekaart.

¹ www.rivm.nl/kennisnetwerkmedicijnresten

² Voor meer informatie over deze stofgroepen zie www.stowa.nl/kennisimpuls



Figuur 3 : Watergebruiksstromen in miljoenen m³ in Nederland op basis van [11][12][13][14].

Verantwoordelijkheid van veel partijen

De complexiteit van de waterhuishouding vertaalt zich ook in complexiteit van het stakeholderlandschap. Voor de verschillende compartimenten in het watersysteem en de verschillende toepassingen zijn verschillende partijen verantwoordelijk. Als voorbeeld volgt hieronder een beschrijving van de verantwoordelijkheden op het gebied van grondwater. Die situatie wordt tezamen met de verantwoordelijkheden voor oppervlaktewater en drinkwater ook weergegeven in Tabel 2.

Grondwater – Voor grondwater ligt de primaire verantwoordelijkheid voor het beheer in hun regio bij de provincies. Zij coördineren de taken van gemeenten en waterschappen op dit gebied, houden toezicht op grondwateronttrekkingen en -lozingen en monitoren grondwaterkwaliteit met de Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG's). Het beheer van stedelijke grondwatersystemen ligt bij de gemeenten. In sommige gevallen zijn er ook verantwoordelijkheden voor het beheer van grondwater toegewezen aan waterschappen of Rijkswaterstaat (RWS). De Rijksoverheid is verantwoordelijk voor beleidskaders en wetgeving zoals de Omgevingswet en de KRW, inclusief monitoring en rapportage aan de EU. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) beheert het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit (LMG). Dat meetnet bestaat uit ongeveer 350 meetpunten, verspreid over heel Nederland.

Hieruit blijkt hoezeer de verschillende verantwoordelijkheden met elkaar verweven zijn en dat inzicht in de waterkwaliteit voor verschillende partijen belangrijk is.

Instantie	Oppervlaktewater	Grondwater	Drinkwater
Waterschappen	Beheer, monitoring en kwaliteit van regionale wateren, vergunningverlening	Soms betrokken bij monitoring, beheer en vergunningen	Indirect via rioolwaterzuivering
RWS	Beheer en monitoring van en vergunningen voor grote wateren (Rijn, Maas, IJssel)	Beheer waar relevant	Beleid en toezicht op landelijke schaal
Provincies	Beleidscoördinatie en vergunningen	Hoofdverantwoordelijk voor grondwaterbeheer (incl vergunningen), PMG's***	Bescherming van drinkwaterbronnen
Gemeenten	Riolering en stedelijk waterbeheer	Beheer stedelijk grondwater	Rioleringsbeheer en bronbescherming
Rijksoverheid (I&W)	Beleidskaders en EU-afstemming, (via Deltares) MNLSO* en LM-GBM**	Beleidsontwikkeling en wetgeving	Beleidsontwikkeling, wetgeving, toezicht
Drinkwater-bedrijven	–	–	Zuivering, levering en monitoring van drinkwater
RIVM	Monitoring en advies, Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM)	Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (LMG)	Richtwaarden en gezondheidsonderzoek
ILT	–	–	Toezicht en handhaving Drinkwaterwet
Omgevingsdiensten	Vergunningverlening, toezicht en handhaving bij lozingen	Toezicht op grondwateronttrekkingen en lozingen	Indirect via toezicht op bedrijven en milieu-belastende activiteiten

* MNLSO = Meetnet Nutriënten Landbouw Specifiek Oppervlaktewater

** LM-GBM = Landelijk Meetnet Gewasbeschermingsmiddelen Land- en Tuinbouw

*** PMG = Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit

Opgemerkt moet worden dat de verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van water verandert op het moment dat grondwater, drinkwater of oppervlaktewater in gebruik wordt genomen als proces- of koelwater. De gebruiker wordt dan eigenaar van het water, inclusief de daarin aanwezige verontreinigingen. Op het moment dat het water na gebruik op oppervlaktewater of riool wordt geloosd, moet het voldoen aan lozingseisen. Vaak is hiervoor zuivering noodzakelijk. De verantwoordelijkheid daarvoor ligt bij de partij die het water loost. Zodoende kan het voorkomen dat een gebruiker niets aan het water toevoegt, maar het alsnog moet zuiveren om het te kunnen lozen.

Door Rijkswaterstaat zijn ongeveer 800 actieve vergunningen afgegeven voor lozingen op rijkswateren. Andere vergunningverleners voor lozing van afvalwater zijn waterschappen, voor lozing op regionale oppervlaktewateren, en omgevingsdiensten, voor indirecte lozingen via het riool. De verplichtingen voor rapporteren en terugdringen van verontreinigingen in lozingswater kunnen dus verder gaan dan KRW-stoffen. Lozingsvergunningen en bijbehorende rapportage kunnen tot wel meer dan 600 individuele stoffen bevatten, bijvoorbeeld voor grote chemische industrieën. De overtuiging is dat inzicht in zulke lange lijsten met getallen, ondanks de initieel misschien afschrikwekkende aanblik, de verbetering van de waterkwaliteit vooruithelpt.

Meerdere dagen water koken vanwege drinkwaterverontreiniging. Kan overlast worden beperkt?

Begin november 2025 werd de regio Utrecht onaangenaam verrast door een advies om drinkwater niet direct te gebruiken voor consumptie maar eerst drie minuten te koken³. De reden: enterokokken in het drinkwater. Deze 'poepbacteriën' zijn een indicator voor fecale besmetting. Uiteindelijk duurde het advies om drinkwater te koken vier dagen.

In de tussentijd hadden diverse werkgevers in het getroffen drinkwatervoorzieningsgebied hun werknemers geadviseerd indien mogelijk thuis te werken en niet naar kantoor te komen. Koffie-automaten werden massaal uitgezet. In ziekenhuizen werden grote hoeveelheden water gekookt of flessen water ingeslagen of gebruik gemaakt van noodwatervoorzieningen. In verzorgingshuizen werd op grote schaal water gekookt en hield personeel de vaak kwetsbare bewoners in de gaten om direct gebruik van het leidingwater te voorkomen.

De vraag dringt zich op of de drinkwatergebruiksstop verkort had kunnen worden en de oorsprong van de besmetting eerder gedetecteerd had kunnen worden als snellere en gevoeliger meetmethoden beschikbaar waren geweest.

Gertjan Medema, hoofdmicrobioloog bij KWR en hoogleraar aan de TUD, legt uit hoe het (in het algemeen) zit. De standaardmethode voor het testen van drinkwater op fecale besmetting is bemonstering gevolgd door kweek en bevestiging via massaspectrometrie met MALDI-TOF. Deze methode neemt 24 tot 48 uur in beslag en voordat het drinkwater weer wordt vrijgegeven, willen drinkwaterbedrijven dat er tweemaal achtereenvolgens negatief testresultaat is. Er is naast de kweekmethode een op polymerase chain reaction (PCR) gebaseerde methode voor de detectie van E. coli en enterokokken beschikbaar, die in 3 tot 4 uur kan worden uitgevoerd. Hoewel deze methode geen valse negatieven produceert, maar wel ongeveer 8% meer positieven, wordt de methode nog niet algemeen gebruikt. Daar wordt wel aan gewerkt. Begrijpelijkerwijs heeft acceptatie van de methode tijd nodig en zou het niet wenselijk zijn indien er, bijvoorbeeld vanwege positieve PCR en negatieve kweek, een zogenaamde knipperlicht-situatie zou ontstaan.

De identificatie van de bron en locatie van de contaminatie is een combinatie van meten, denkwerk en ervaring. In het geval van de Utrechtse drinkwaterbesmetting lag de oorzaak in een scheur in het dak van de reinwaterkelder, zo kwam weken later aan het licht. Vaak is de directe oorzaak van drinkwater- (en overigens

3 NB: eind december 2025 en begin januari 2026 is er ook in de regio Amersfoort (tweemaal) een kookadvies gegeven in verband met enterokokken-besmettingen. Dit trof 15000 resp. 85000 huishoudens en duurde 4 resp. 13 dagen.

ook zwemwater)contaminatie, extreme regenval, waardoor rioleringen overbelast worden en rioolwater op plekken terecht komt waar het niet hoort. Reinwaterkelders, zoals die in Utrecht, die in november 2025 gecontamineerd was, staan niet, zoals de rest van het drinkwaterleidingnet op druk. Daardoor kunnen verontreinigingen relatief gemakkelijker binnenkomen. Een andere oorzaak van contaminatie is het wegvallen van druk, waardoor materiaal dat normaliter door het water naar buiten wordt gedrukt naar binnen kan komen. Dit kan zich voordoen bij onderhouds- of reparatiewerkzaamheden en is een van de redenen dat na bepaalde werkzaamheden wordt getest, voordat het drinkwater wordt 'vrijgegeven'. Vanzelfsprekend is een analyse met een korte responstijd in zulke gevallen wenselijk.

PCR-analyse zou daarvoor een verbetering zijn. Een daling van de kosten van PCR-analyses in vergelijking met de kosten van kweek en telling kan helpen om vrijgave te versnellen.

Het zou mooi zijn als je kleine lekken nog eerder, voordat fecale besmetting plaatsvindt, zou kunnen detecteren, bijvoorbeeld door te kijken naar verschillende indicatoren van in de bodem of omgeving aanwezig microbiom, die aangeven waar een intrusie vandaan komt. Periodieke e-DNA analyse kan daarbij helpen. Mogelijk zijn variaties in concentraties van ionogene of organische microcontaminanten ook voor *early-warning* systemen te gebruiken. Het veld van monitoring voor drinkwaterveiligheid is dus in beweging en versnelling daarvan kan toekomstige overlast verminderen en helpen te voorkomen.



Bron: Vitens

3 De rol van meten in waterkwaliteitsbeheersing

De rol van meten in waterkwaliteitsbeheersing is meervoudig. In de eerste plaats kunnen metingen systeembegrip verschaffen. Een tweede toepassing is het identificeren van de bronnen van verontreinigingen. Een bijzonder belangrijke rol is het aanzetten tot actie ter verbetering van de waterkwaliteit. Een vierde is het routinematig monitoren van de waterkwaliteit en het monitoren van de effecten van interventies. In de volgende paragrafen wordt ingegaan op deze verschillende rollen.

Systeembegrip

De in het vorige hoofdstuk genoemde kwaliteitssparameters staan niet op zichzelf. De chemische en fysische parameters zijn van invloed op de biodiversiteit en op de ecologische waterkwaliteit in het algemeen. Deze relatie is een component van het systeembegrip en metingen zijn essentieel om die relatie helder te krijgen. Het systeembegrip is de voeding van expertsystemen. Systeembegrip verschaft inzicht in de relaties tussen meetbare parameters, doelstellingen en interventies. Waar verschillende richtlijnen verschillende doelen hebben, is het belangrijk deze relaties inzichtelijk te maken en te weten te komen hoe gevoelig de doelparameters zijn voor veranderingen in andere systeemp parameters. In het geval van de KRW zijn er ontegenzeggelijk veel relaties tussen de ecologische kwaliteit en de chemische kwaliteit van een waterlichaam. Voor de invloed van de chemische kwaliteit op de kwaliteit van zwemwater gelden weer andere relaties. Hoe sterk

dit soort relaties zijn, verschilt dus per doelstelling en kan ook nog eens per waterlichaam verschillen.

Voor het genereren van systeembegrip zijn veel metingen nodig. Correlatie van de gemeten data, door de inzet van conventionele methoden of door de inzet van kunstmatige intelligentie, genereert suggesties voor relaties in het systeem. Dergelijke suggesties kunnen dienen als input voor hypothesen die getest worden om relaties al dan niet aan te tonen.

Bronidentificatie

Voor effectiviteit van interventies is het van belang te weten wat de bron van verontreinigingen of versturende factoren is. Bronnen kunnen diffuus van aard zijn, of het zijn zogenoemde puntbronnen. Een complicerende factor bij bronidentificatie is, dat de concentraties van veel vervuilingen (zowel chemische als biologische) variëren in de tijd; ze zijn afhankelijk van afstand tot de bron, weersomstandigheden, debiet, vermenging met andere stromen, etc. De mate van fluctuatie in concentraties en concentratieverhoudingen is evenwel een hulpmiddel bij bronidentificatie. Gecorreleerde concentraties kunnen duiden op een gemeenschappelijke oorsprong. Een andere belangrijke factor bij bronidentificatie is plaats; door op verschillende plaatsen te meten kunnen gradiënten in beeld worden gebracht die helpen bij de bronidentificatie. Hiermee wordt duidelijk dat metingen ten behoeve van bronidentificatie bij voorkeur een hoge meetfrequentie

hebben en op verschillende locaties plaatsvinden of zelfs mobiel zijn.

Informer en handelingsperspectief verschaffen

Waterkwaliteitsbeheersing vereist actie op basis van goede informatie. Metingen kunnen die benodigde informatie verschaffen, maar dat is nog geen garantie voor actie. Het is cruciaal dat de data die met metingen worden verkregen, worden omgezet in informatie die aanzet tot handelen of beslissen. Daarvoor is meer nodig dan het 'droog' presenteren van de gemeten data. Allereerst moeten de gemeten data in een perspectief worden geplaatst, zodat inzichtelijk wordt of er sprake is van een verandering of een afwijking ten opzichte van een gesteld doel. Hiervoor is beschikbaarheid van historische data en doelstellingen instrumenteel. Ten tweede moet de data worden omgezet in voor de doelgroep begrijpbare informatie.

Voor het omzetten van meetresultaten in acties of beslissingen is nog meer nodig. De gebruiker moet goed geïnformeerd zijn over de verschillende opties waaruit hij kan kiezen. Tenslotte moet de gebruiker kunnen zien wat in zijn specifieke situatie naar verwachting het beste resultaat zal opleveren.

(Effect)monitoring

Monitoring is de routinematige meting van parameters in de tijd. Dit dient twee doelen. In de eerste plaats verschaft het inzicht in de fluctuaties die zich 'van nature' voordoen onder 'normale' omstandigheden. Deze informatie is belangrijk om individuele metingen in perspectief te kunnen plaatsen. Daarnaast kunnen afwijkingen van de normale situatie worden gebruikt in een *early-warning* systeem om aan te geven dat er een verandering is die mogelijk relevant is voor de waterkwaliteit en (mogelijk) nader onderzoek vereist. Deze benadering wordt onder andere door drinkwaterbedrijven ingezet in de buurt van innamepunten van oppervlaktewater. Op basis van monitoringgegevens kan worden besloten om over te gaan tot een inname-stop of deze op te heffen. Een ander voorbeeld is het instellen van een tijdelijke onderbreking van lozing op oppervlaktewater. Ook in de procesindustrie wordt gebruikgemaakt van – continue – monitoring, vaak met een directe link naar een Distributed Control System (DCS).

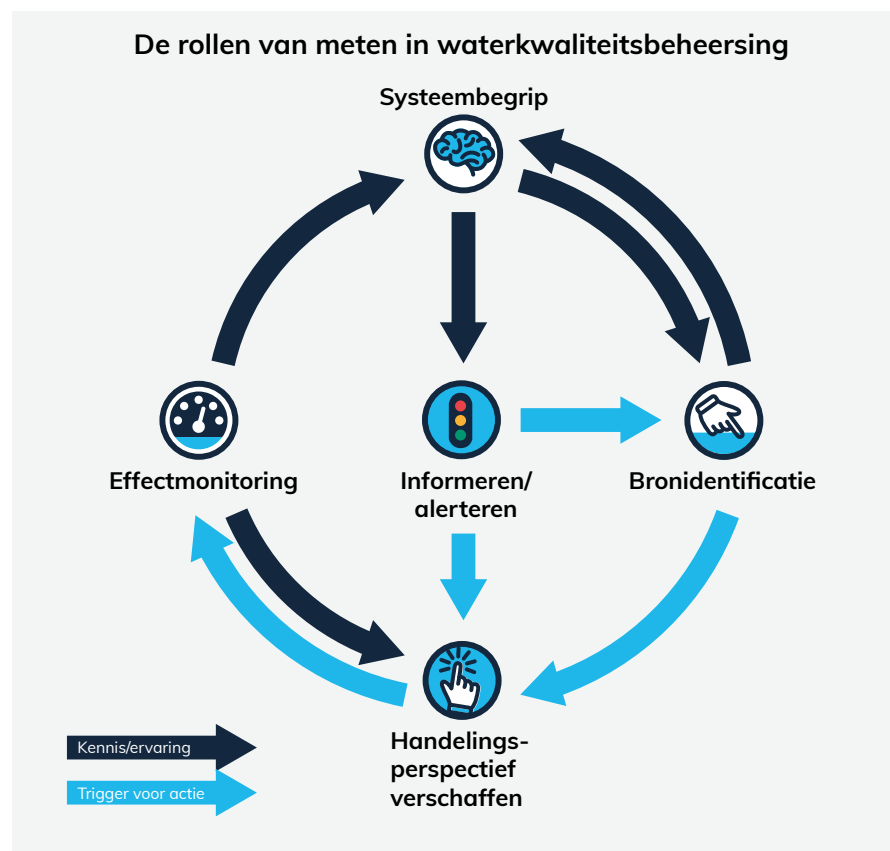
De tweede functie van monitoring is het meten van de effecten van interventies: effectmonitoring. Hierbij kan het gaan om de effecten van een interventie op de concentratie van een verontreiniging, maar ook om de monitoring van een gerelateerde uitkomst, zoals de ecologische kwaliteit van een waterlichaam.

De relatie tussen de verschillende rollen van meten in de praktijk van waterkwaliteitsbeheersing is weergegeven in Figuur 4.

Opgemerkt moet worden dat er (ook in historisch perspectief) sprake is van een wederkerigheid tussen

de ontwikkelingen in meettechnologie enerzijds en de rol(len) van het meten anderzijds. Niet alleen bepaalt de technologie wat er gemeten kan worden, maar de doelen van de meting beïnvloeden ook de ontwikkeling van de technologie. Met het beschikbaar komen van meer gevoelige meetmethoden – en de daarmee gepaard gaande uitbreiding van het spectrum aan stoffen dat (op laag niveau)

kan worden gemeten – versterkt het inzicht in de toestand van het watersysteem (systeeminzicht). Dit kan op zijn beurt, in het geval van zorgwekkende vervuilingen, weer aanleiding geven voor de ontwikkeling van in het veld inzetbare meettechnieken waarmee vervuilingsbronnen opgespoord kunnen worden en de effecten van interventies en beleid kunnen worden vastgesteld.



Figuur 4 : De rollen van meten in waterkwaliteitsbeheersing. Deze rollen zijn met elkaar verbonden door het leveren van kennis of ervaring en het initiëren van actie.

4 State of the art in metingen voor waterkwaliteitsbeheersing

De meting

Het begrijpen en bewaken van waterkwaliteit is essentieel. Voor operationele beslissingen, monitoring, controle, beleid en alertering is betrouwbare informatie over water en afvalwaterkwaliteit nodig. Dit vraagt om adequate metingen, analyse en presentatie van resultaten.

Er zijn vier benaderingen om waterkwaliteit te bepalen. De eerste en meest gebruikte is laboratoriumanalyse van een genomen watermonster. Bij de tweede wordt het monster ter plekke handmatig geanalyseerd; hierbij is menselijke actie op locatie noodzakelijk. Deze methode wordt in de routekaart aangeduid als on-site analyse. De derde benadering betreft volledig automatische analyse op locatie, al dan niet inclusief volautomatische bemonstering. Deze in situ meting maakt analyses mogelijk zonder menselijke tussenkomst. De vierde, nog beperkt toegepaste, methode is remote sensing, waarbij water op afstand wordt geanalyseerd, bijvoorbeeld vanuit de lucht of ruimte.

Elke benadering heeft specifieke voor- en nadelen, die zijn samengevat in Tabel 3. De laatste rij van de tabel benoemt de belangrijkste uitdagingen en knelpunten in relatie tot de doelstellingen van de routekaart.

Tabel 3 : Eigenschappen van huidige benaderingen voor het meten van waterkwaliteit.

Eigenschap	Steekmonster & Laboratoriumanalyse	Steekmonster & on-site analyse	In situ meting	Remote sensing
Snelheid tot resultaat	dag - maand	< 1 uur	seconde – uur	seconde – uur
Specificiteit resultaat	+++	+	-	-
Gevoeligheid / detectiegrens	+++	++	+	-
Standaardisatie / Acceptatie door toezichthouder	+++	+	-	-
Noodzaak specialistisch personeel	Hoog	Minder hoog	Minder hoog	Hoog
Kosten Apparatuur (relatief)*	Hoog	Laag - Middel	Middel	Hoog
Kosten Personeel (relatief)*	Hoog	Middel	Laag	Laag
Flexibiliteit / analyse pakket	+++	+	-	-
Materiaalverbruik per meting	Hoog	Middel	Laag - Geen	Geen
Mobiel / te monteren op drone	---	---	++	+++
Typische voorbeelden van bepalingen	Gewasbeschermingsmiddelen, microplastics, PFAS, pathogenen	Nutriënten, metalen, CZV, TOC, micro-organismen	Geleidbaarheid, zuurgraad, troebelheid, opgelost zuurstof, nutriënten, algen	Algengroei, troebelheid, kleur
Belangrijkste knelpunt	Snelheid en kosten	Onderhoud en materiaalgebruik	Specificiteit en aanhechting van vuil	Gevoeligheid en beperkt aantal meettechnologieën

*: dit geeft de verhouding weer waar de meeste kosten vallen en is geen kwantitatieve indicatie voor de hoogte van de kosten.

De gouden standaard in waterkwaliteitsmetingen is monsternamen met daaropvolgende laboratoriumanalyse. Dit is vanuit historisch perspectief verklaarbaar, omdat een methode voor het meten van een doelparameter doorgaans eerst in het laboratorium wordt ontwikkeld en pas daarna eventueel naar een veldmeting wordt doorontwikkeld. In wet- en regelgeving wordt doorgaans niet alleen voorgeschreven welke parameter moet worden gemeten, maar ook hoe dit moet gebeuren. In de regel moet voor introductie van een nieuwe bepalingsmethode aangetoond worden dat deze even goed of beter is dan de actuele bepalingmethode.

De huidige analytische laboratoriumtechnieken zijn zeer krachtig, en kunnen een breed spectrum aan stoffen met hoge nauwkeurigheid en gevoeligheid meten, tot een niveau van nanogrammen per liter. De keerzijde van deze medaille is dat de kosten voor apparatuur, verbruiksmateriaal en personeel hoog zijn en dat de doorlooptijd ten gevolge van monstername, transport, voorbehandeling, analyse en interpretatie lang is. Dit leidt ertoe dat meetresultaten pas na dagen of weken beschikbaar komen. In uitzonderlijke gevallen, zoals bij bedreiging van de volksgezondheid, wordt het proces versneld, maar laten resultaten nog steeds uren tot dagen op zich wachten (zie ook het kader over drinkwaterkwaliteit in Hoofdstuk 2). Door het hoge kostenplaatje is het aantal monsters dat kan worden genomen ook (zeer) gelimiteerd. Deze benadering geeft de dynamiek van water- of afvalwaterkwaliteit daardoor vertraagd en niet volledig weer.

Daar waar het lab uitblinkt in gevoelige en specifieke analyses, bieden *on-site* analyses en in het bijzonder *in situ* metingen, snelheid en de mogelijkheid tot het *real-time* volgen van de dynamiek in waterkwaliteit. Dit laatste gaat echter ook vaak ten koste van de specificiteit en gevoeligheid. Wel zijn geavanceerde (*on-site*) microbiologische technieken, zoals PCR, als mobiel systeem beschikbaar. Deze vinden echter nog geen routinematige toepassing in het waterkwaliteitsdomein. In de medische wereld worden deze technieken ingezet voor *point-of-care* toepassing of bij de uitbraak van infectieziekten. De bruikbaarheid van mobiele qPCR in de watersector is wel al vastgesteld voor bijvoorbeeld detectie van *E. coli* of proliferatie van blauwalgen in zwembadwater. Lokale metingen van CZV en anorganische parameters, zoals metalen en nutriënten, kunnen zowel *on-site* als *in situ* worden uitgevoerd.

Bij de stap naar *in situ* metingen krimpt het aantal meetbare parameters in het algemeen verder. De oorzaak hiervan ligt in de uitdagingen die verbonden zijn aan de ontwikkeling en toepassing van dit soort metingen. We noemen in dit verband grootte, gewicht en energievoorziening (Size, Weight and Power, SWaP) en aangroei van vuil op de onderdelen waarmee de meting wordt uitgevoerd (*fouling*). Regulier gebruik van *in situ* metingen is vooralsnog voornamelijk beperkt tot de inzet van sensoren⁴ voor fysisch-chemische parameters (o.a. temperatuur, pH, geleidbaarheid, zuurstof, troebelheid), nutriënten (nitraat, ammonium) en organische somparameters (CZV, TOC, chlorofyl). Ook het aantal plaatsen waarop *in situ* metingen worden ingezet, is beperkt

tot belangrijke knooppunten in waterketens en watersystemen. Toepassingen zijn monitoring van (zuiverings)processen en als *early-warning* om veranderingen in waterkwaliteit te detecteren, bijvoorbeeld bij innamepunten van drinkwater. Voor analyse van de aard en oorzaak van de verandering wordt vervolgens teruggegrepen op monsternamen en analyse in het laboratorium. In sommige gevallen wordt geautomatiseerde monsternamen wel direct aangestuurd door aanwezige *in situ* sensoren.

Ook is een aantal biomonitoren beschikbaar waarin de reactie van levende organismen (algen, bacteriën, watervlooien, mosselen) op de samenstelling van het water wordt gemeten. Deze reageren bij uitstap op stoffen die schadelijk zijn voor het organisme in de biomonitor. Biomonitoren zijn complexe instrumenten die kostbaar zijn en onderhoudsintensief. Ze worden daarom alleen ingezet op kritische locaties, zoals bijvoorbeeld de innamepunten van oppervlaktewater voor drinkwaterproductie. Daarnaast is er een klein aantal geautomatiseerde systemen voor het *in situ* detecteren van microbiologische besmettingen, zoals *E. coli* of totale coliformen, die als *early-warning* systeem worden ingezet.

Omdat meten kostbaar is, zowel in het lab als *on-site* als *in situ*, dient een verstandige keuze te worden gemaakt over wanneer en hoe er wordt gemeten. Hoogfrequente *in situ* of snelle *on-site* metingen worden ingezet wanneer a) een onmiddellijke interventie mogelijk is op basis van de gemeten waterkwaliteit, zoals op een water- of afvalwaterzuivering, of b) wanneer dit door wet- en

⁴ Een sensor is een apparaat dat een fysieke of chemische eigenschap in de omgeving waarneemt en omzet in een meetbaar elektrisch signaal.

regelgeving wordt afgedwongen, bijvoorbeeld ter bescherming van de volksgezondheid of het milieu. Als de meting primair is bedoeld voor het verzamelen van informatie en het vergroten van systeembegrip, wordt hoogfrequent meten slechts sporadisch toegepast. In die gevallen is monsternamen, in combinatie met analyse in een laboratorium, de meest gekozen benadering.

Data-opslag en presentatie

Op het gebied van dataverwerking en -management is de afgelopen decennia veel mogelijk geworden, mede door de sterke groei in rekenkracht en opslagmogelijkheden. In principe is real-time weergave van meetresultaten in een dashboard technisch goed mogelijk. Ook is de koppeling met plaats goed te realiseren middels GIS (geografische informatiesystemen). Deze mogelijkheden worden echter nog niet optimaal benut ten behoeve van databeheer en informatievoorziening over waterkwaliteit. De manier waarop data worden verzameld, verwerkt en opgeslagen verschilt sterk per aard van de toepassing en is hierop toegesneden. Bredere ontsluiting, bijvoorbeeld laagdrempelig gebruik door niet-experts zoals burgers maar ook bestuurders, is daardoor niet mogelijk. Hetzelfde geldt voor gebruik van data voor meerdere toepassingen, zoals monitoring van natuurlijke variatie, monitoren van het effect van interventies, genereren van systeembegrip, trainen van expertsystemen, toezicht, etc.

Het gebrek aan centrale dataverzameling en ontsluiting staat op dit moment met name de ontwikkeling en het gebruik van systeeminzicht en expertsystemen in de weg. De oorzaak is duidelijk. Door het grote aantal nutsbedrijven en organisaties die verantwoordelijk zijn voor verschillende onderdelen van de natuurlijke en stedelijke waterkringloop, is het waterbeheer in Nederland gefragmenteerd. Deze fragmentatie strekt zich ook uit over het verzamelen, beheren en verwerken van data, wat leidt tot gescheiden datasets binnen organisaties en domeinen. Deze situatie belemmert de ambitie om tot geïntegreerd waterbeheer te komen. Daarnaast beperkt ze - vanwege gebrekkige interoperabiliteit en datadeling - het gebruik van het potentieel van digitale technologieën, zoals Internet of Things (IoT), kunstmatige intelligentie (AI) en big data-analyse. Technisch zijn op dit punt weinig belemmeringen. Om deze situatie te doorbreken, zijn vooral regie, vertrouwen en eigenaarschap van de verschillende partijen en sectoren nodig.

Op Europees niveau wordt strategisch ingezet op het benutten van de waarde van data ten gunste van economie en samenleving. Als onderdeel van de Europese datastrategie is de EU gestart met de ontwikkeling van Gemeenschappelijke Europese Dataspaces⁵ in diverse strategische sectoren. De watersector heeft hierin historisch gezien echter een achterstand. In tegenstelling tot sectoren zoals energie en gezondheidszorg, zijn er geen gecoördineerde dataplatforms voor water.

Ook in Nederland is deze kloof zichtbaar. Er is een dringende behoefte aan een gecentraliseerd data-platform of *dataspace* waarin diverse en heterogene databronnen kunnen worden geïntegreerd, data worden gestandaardiseerd en dataverwerkingsprocessen worden geharmoniseerd. Met de brede inzet van IoT-sensoren en communicatie tussen verschillende software-applicaties, is standaardisatie cruciaal voor interoperabiliteit en hergebruik van data. Het verrijken van datasets met voldoende metadata kan hun FAIRness (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) vergroten, terwijl kwaliteitscontrole en governance-mechanismen zorgen voor datasoevereiniteit en veilige en betrouwbare datadeling. Platforms die daarin voorzien, vormen essentiële infrastructuur voor de ontwikkeling van AI- en ML-oplossingen in waterbeheer.

Om deze uitdagingen aan te pakken, is binnen het Horizon Europe-project WATERVERSE⁶ een Water Data Management Ecosystem (WDME) ontwikkeld (zie kadertekst). Daarbij is ingezet op het internationaal delen van data, data-kwaliteitsbeoordeling, standaarden voor dataverwerking en -visualisatie en real-time compatibiliteit. Het systeem wordt nog niet algemeen gebruikt; er is nog opschaling nodig.

Voor het coördineren en faciliteren van betrouwbare en gestandaardiseerde data bestaat in Nederland ook het Waterkwaliteitsportaal van Informatiehuis Water⁷. Hierin delen Rijkswaterstaat en Waterschappen data over de Nederlandse waterkwaliteit, waterveiligheid en droogte.

⁵ digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-spaces

⁶ waterverse.eu

⁷ wkp.rws.nl/geoviewer

Watterverse faciliteert Europese dataspaces voor waterkwaliteit

Watterverse is een samenwerking tussen 17 partijen in 10 Europese landen. Het doel is de drempel voor waterstakeholders te verlagen om deel te nemen aan dataspaces en de sector voor te bereiden op aansluiting bij de zich ontwikkelende Europese interne 'datamarkt'. De samenwerking bestaat uit een interdisciplinaire groep partners van onderzoeksinstituten, sociale wetenschappers, waterbedrijven, water-technologieproviders, innovatieve bedrijven en data-experts. Het project heeft een Water Data Management Ecosysteem (WDME) ontwikkeld. De bijbehorende Watterverse gereedschappen verbeteren de bruikbaarheid van data en metadata voor interoperabiliteit en data-intensieve processen. Hierdoor wordt de onderkende waarde van data verhoogd.

Het WDME is gedemonstreerd in zes praktijk-cases, waaronder één in Nederland. In samenwerking met PWN en KWR richtte de Nederlandse case zich op het optimaliseren van de winning van IJsselmeerwater voor drinkwaterdoeleinden, met aandacht voor waterkwaliteit en de invloed van het IJssel- en Rijnsysteem.

Deze use case vereiste de integratie van *in situ* en remote (satelliet) sensing-datasets voor de voorspelling van chlorideconcentraties. Verschillende datasets, waaronder gegevens over het weer, waterkwaliteitsdata



Bron: PWN

en satellietbeelden van algengroei, werden met behulp van het WDME verzameld, geharmoniseerd en gedeeld tussen meerdere organisaties. Door opname van de data in een *machine learning*/AI-model werden dashboards gemaakt die operators kunnen gebruiken voor (near) *real-time* advies voor innamestops van IJsselmeerwater in verband met hoge zoutgehaltes.

Op een hoger abstractieniveau resulteerde deze pilot in eenvoudigere datastromen, een

significante reductie van het handwerk en snellere en nauwkeurigere waterkwaliteitsbeoordeling. Belangrijke succesfactoren bleken het gebruiksgemak van het systeem en automatisering van de gegevensstromen.

Hoewel dit een centraal punt voor ontsluiting biedt, worden lang niet alle waterkwaliteitsdata in het portaal opgenomen. Dit geldt bijvoorbeeld voor de gegevens die gemeenten of drinkwaterbedrijven verzamelen. De data die wel in het systeem zitten, zijn ook niet real-time beschikbaar en diverse potentieel relevante metadata ontbreken.

In het algemeen zijn er nog geen grootschalige data-systemen waarin naast opslag en toegang ook een overzicht wordt geboden van mogelijke interventies en hun effectiviteit. Er is momenteel in Nederland geen regie en geen centraal databeheer, waardoor bestaande data niet of niet snel beschikbaar zijn, en het waterkwaliteitsbeeld onvolledig is. Ook ontbreekt het buiten de procesomgeving aan vertaling naar keuzes in interventies en het monitoren van de impact daarvan. Hierdoor is de koppeling met handelingsopties en -perspectief nog niet in zicht. Hoewel de informatietechnologie ver genoeg is om in deze behoefte te voorzien, ontbreekt het aan gevalideerde waterkwaliteitsdata, actuele metingen en praktijkgegevens.

Ontwikkelingen en trends

Recente technologische ontwikkelingen hebben ook hun effect op de mogelijkheden voor het meten van waterkwaliteit en het vertalen van data naar handelingsperspectief. Beschikbare instrumentatie is de afgelopen decennia beter, goedkoper en gebruiksvriendelijker geworden. Daarnaast zijn er nieuwe capaciteiten ontwikkeld. Deze sectie geeft een beknopt overzicht van de meest bepalende ontwikkelingen en trends.

Non-target screening

Doelstofanalyse (target screening) is niet meer voldoende om alle potentiële verontreinigingen te kunnen monitoren. Non-target screening biedt hiervoor uitkomst. Dit is een generieke screening, waarbij zoveel mogelijk bekende én onbekende stoffen worden gemeten. Door specifieke chemische kenmerken kunnen onbekende stoffen in verschillende monsters worden vergeleken, of kan een trendanalyse worden uitgevoerd. Voorbeelden van toepassingen zijn het monitoren van de effectiviteit van waterzuiveringsprocessen, het maken van een chemisch profiel van RWZI-effluent (bijvoorbeeld voor het opsporen van verboden drugs), en alertering bij inname van oppervlaktewater voor drinkwaterproductie.

Biologische effectmetingen

Door middel van stofgericht monitoren is het niet mogelijk om de effecten van alle aanwezige stoffen op de ecologie en humane gezondheid in beeld te brengen. Biologische effectmetingen met bioassays worden daarom in toenemende mate ingezet om de gecombineerde effecten van complexe mengsels voor een specifiek biologisch eindpunt in beeld te brengen. In een bioassay wordt een biologisch systeem, bijvoorbeeld een organisme of een celcultuur, blootgesteld aan een mengsel van chemische stoffen uit een watermonster en wordt het effect op het gedrag of de ontwikkeling gemeten. De bioassay kan een directe indicatie van toxiciteit geven (bijvoorbeeld verminderde groei, sterfte), of een indirecte maat zijn voor het effect (bijvoorbeeld fluorescentie, luminescentie). Bioassays zijn vaak gevoeliger dan de detectielimieten van chemische analyses, en

meten meestal effecten van stoffen, inclusief effecten van mengseltoxiciteit. Ook kunnen zij effecten meten bij concentraties die lager zijn dan die waar risico's voor mens en milieu ontstaan en zo indicaties geven voor die risico's.

Remote sensing

Zoals eerder aangegeven is remote sensing een (relatieve) nieuwkomer onder de routinematig ingezette waterkwaliteitsmetingen. Onder remote sensing wordt verstaan: het op afstand en contactloos meten van (waterkwaliteits)parameters, bijvoorbeeld op basis van satellietbeelden. Het afgelopen decennium is de resolutie van deze beelden goed genoeg geworden om kleine wateren en watergangen te kunnen monitoren. Met name chlorofyl, troebelheid, temperatuur en kleur kunnen worden bepaald.

Drones

Door sensoren op mobiele platformen te monteren, zoals drijvende of vliegende drones, onderwaterdrones of autonome inspectierobots, kunnen met een beperkt aantal sensoren kosteneffectief meerdere (moeilijk toegankelijke) plaatsen worden bereikt en is het mogelijk om profielmetingen (concentratieprofielen, diepteprofielen) uit te voeren. Hierdoor wordt de (geografische) dekking van metingen vergroot. Drones met eenvoudige (fysisch chemische) sensoren en camera's worden al ingezet in het waterbeheer, onder meer om waterkwaliteitsprofielen op te nemen. In een toekomstbeeld worden drones uitgerust met krachtigere meetapparatuur of ingezet om watermonsters te verzamelen, om op een tijds- en kostenefficiënte manier meerdere monsterpunten in een waterlichaam te bereiken.

Passive sampling

Ook via laboratoriummetingen is het mogelijk om kennis te krijgen over de aanwezigheid van een doelstof over een langere periode. Hiervoor worden *passive samplers* gebruikt. Daarbij wordt een daarvoor geselecteerd of ontwikkeld materiaal gedurende een bepaalde tijd aan het water blootgesteld, waarbij stoffen door adsorptie of absorptie op of in het materiaal worden verzameld om vervolgens te worden gemeten. Piekconcentraties die optreden buiten reguliere discrete monsternamemomenten kunnen worden hierdoor meegenomen in de bemonstering [15]. *Passive samplers* zijn al langere tijd beschikbaar, maar nieuwe selectieve materialen – mogelijk ook voor pathogenen en andere micro-organismen – kunnen hun toepasbaarheid vergroten [16].

Sensingtechnologie

In de (wetenschappelijke) literatuur is een veel breder spectrum aan meetprincipes beschreven dan momenteel toegepast in commercieel beschikbare instrumenten. Sommige hiervan worden wel al gebruikt, maar nog niet routinematig voor waterkwaliteitsbepaling; andere bevinden zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Ter illustratie van de veelheid aan oplossingsrichtingen, volgen hieronder enkele voorbeelden van technieken die van betekenis kunnen zijn voor het meten van waterkwaliteit.

- Sensoren met een selectieve functionaliteit – Dit zijn generieke sensoren die worden voorzien

van een coating waardoor ze gevoelig worden voor specifieke doelstoffen of organismen. Mogelijkheden voor dit soort coatings zijn bijvoorbeeld *molecularly imprinted polymers* (MIPs), antilichamen, aptameren, eiwitten [17]. Alternatief kunnen aan een monster markers met selectiviteit voor het target worden toegevoegd, die vervolgens door de sensor worden gedetecteerd. Voorbeelden zijn fluorescerende markers, gouden nanodeeltjes en quantum dots.

- Optische meettechnieken – Een groep van spectroscopische technieken die de interactie tussen UV/zichtbaar/infrarood licht en stoffen bepalen. In de procesindustrie worden dergelijke technieken, zoals ramanspectroscopie, reeds breed ingezet. In het waterdomein worden ze primair in laboratoria ingezet op zorgvuldig voorbereide monsters. In het bijzonder op het gebied van fotonische metingen⁸ vindt grote vooruitgang plaats doordat lasers en detectoren steeds kleiner, energiezuiniger en goedkoper worden. Fotonica kan ook worden gebruikt voor het uitlezen van bovengenoemde sensoren. Vanwege de variabiliteit en lage concentraties van watercontaminanten zijn interferentie en bepalingsgrenzen van analyten echter nog uitdagingen voor toepassing van fotonische technieken voor waterkwaliteitsanalyse.
- Voltammetrie – Een elektrochemische methode om met name metalen te meten. Naar verwachting wordt door toepassing van nieuwe elektrode-materialen, zoals boron-doped diamond, carbon nanotubes of grafeen, het meten van arseen,

zware metalen en andere contaminanten in de toekomst vereenvoudigd.

- Microfluidische systemen – Door de toepassing van microfluidica kunnen meetprocedures waarin chemicaliën worden gebruikt, worden geminiaturiseerd, wat ze on-site inzetbaar maakt. Zulke systemen kunnen ook worden gebruikt in de monstervoorbehandeling, bijvoorbeeld in een concentratiestap, waardoor de prestaties van on-site systemen verbeteren.

Belangrijke belemmeringen voor deze laatste benadering met selectieve sensoren zijn de productiekosten en de schaalbaarheid. Een ander potentieel knelpunt voor de toepassing van dergelijke systemen is het gebruik van (hulp)stoffen. Veel van deze sensoren zijn afhankelijk van dure nano-materialen, waardoor grootschalige toepassing kostbaar is. Dit wordt verder versterkt door het feit dat deze sensoren typisch gericht zijn op één enkele analyt; voor een combinatie van doelstoffen is een combinatie van meerdere sensoren nodig. Het voordeel van selectieve sensoren is dat ze geminiaturiseerd kunnen worden en in een array toegepast kunnen worden, wat simultane meting mogelijk maakt.

In een priller stadium van ontwikkeling zijn zogenoemde quantumsensoren. Sensoren die gebruikmaken van quantumeigenschappen verhogen in potentie de gevoeligheid van detectie. Voor het meten van waterkwaliteit zou dit kunnen leiden tot gevoeligere alternatieven voor bestaande detectoren. Daarnaast kunnen quantumeigenschappen

⁸ Fotonica is het genereren, transporteren, manipuleren en detecteren van fotonen. Door de techniek te combineren met de kennis van interactie tussen fotonen en materie kan deze worden gebruikt om stoffen, deeltjes en micro-organismen te meten.

worden gebruikt om binding van stoffen aan specifieke oppervlakten zichtbaar te maken. Daarvoor gelden wel de eerdergenoemde aandachtspunten voor dit soort selectieve systemen.

Het ontwikkelen van geheel nieuwe concepten, zoals bijvoorbeeld quantumsensoren met nanomaterialen voor selectieve detectie, tot een succesvol product is een risicovol en langdurig traject: slechts een beperkt percentage van de concepten leidt tot succesvolle innovatie en de doorlooptijd bedraagt al snel 10–15 jaar.

Effectief actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing vraagt ook om oplossingen die op kortere termijn effect sorteren. Schaalbaarheid, commercialisering en standaardisering zijn momenteel uitdagingen die grootschalige toepassingen op de korte termijn in de weg staan. Het is daarom aan te raden om zowel in te zetten op het effectief toepassen van bestaande oplossingen, verbeteringen en processen, als op nieuwe methoden voor doelstoffen en organismen die met de huidige technologie niet (afdoende) kunnen worden bepaald.

Dataoverdracht en opslag

In het afgelopen decennium zijn grote stappen gemaakt in dataoverdracht, verwerking en visualisatie. *Real-time* overdracht van meetgegevens naar een centrale dataopslag, via ofwel een bekabelde of een draadloze verbinding, zijn standaard beschikbare opties. Door gebruik van Edge computing kan gestandaardiseerde dataverwerking on-site, op een meetinstrument zelf worden uitgevoerd, wat datacommunicatie en -opslag vereenvoudigt. Hierdoor zijn systemen in staat om zelf de kwaliteit van

geproduceerde data te beoordelen, en waar dit niet gebeurt zijn geavanceerde methoden beschikbaar om in de datacentrale automatische validatie en correctie uit te voeren. Daarnaast is het weergeven van informatie zowel getalsmatig als grafisch mogelijk op lokaal geïnstalleerde bediencomputers en in web-gebaseerde dashboards. Deze laatste worden vaak als aparte diensten aangeboden en kunnen volledig aan de wens van een gebruiker worden aangepast. Partijen bieden in toenemende mate het hele procedé van meting tot resultaat aan als dienst (Data-as-a-Service ofwel DaaS).

Geavanceerde data-analyse

De watersector werkt in toenemende mate op een *data-driven* manier. Dit betekent dat data direct worden verzameld en verwerkt tot informatie om sturing en besluitvorming te ondersteunen. Momenteel zijn veel van de water- en afvalwaterzuiveringen in Nederland vrijwel geheel geautomatiseerd en worden ze autonoom (dus zonder menselijke operator) aangestuurd. Het gebruik van modellen om processen te beschrijven is dus een gevestigde praktijk, maar met de opkomst van *machine learning* en kunstmatige intelligentie komen daar in snel tempo data-gedreven procesregelings-toepassingen en *digital twins* bij. Deze bepalen bijvoorbeeld aan de hand van sensordata de actuele toestand van een zuiveringsproces en kunnen daarmee toekomstige toestanden voorspellen op basis waarvan kan worden (bij)gestuurd. Door de toenemende kracht van deze modellering worden ze veelomvattender en kunnen ze steeds complexere systemen aan – van een enkel proces tot een volledige zuiveringsinstallatie of toekomstig mogelijk een

waterketen of watersysteem. Voorwaarde is wel dat de *digital twins* worden gevoed met voldoende hoogkwalitatieve data.

Machine learning en *hybrid modelling* maken het ook steeds makkelijker om patronen in meetdata te herkennen. Dit versterkt de kracht van *fingerprinting*-technieken, waarbij data van meerdere sensoren worden gecombineerd. Naar verwachting kunnen hiermee systeemtoestanden worden beschreven en geïdentificeerd. Dit kan mogelijk worden ingezet voor *early-warning* functionaliteiten, detectie en handhaving van incidenten, maar ook voor de aansturing van processen.

Door inzet van grote aantallen *low-cost* sensoren – *low-capability* sensoren die met elkaar zijn verbonden en waarvan de data *real-time* worden geanalyseerd – kan het mogelijk worden om patronen te herkennen en/of de dynamiek van de ruimtelijke verdeling van contaminanten in een waterlichaam te adresseren. Een eventuele lagere kwaliteit van sensoren wordt (deels) gecompenseerd doordat meetreeksen onderling kunnen worden gevalideerd. Ook het ontdekken van relaties tussen parameters wordt vergemakkelijkt door de verhoogde rekenkracht en data-analyse en -mining technieken. Voorwaarde daarvoor is wel dat de kwaliteit van de gemeten data voldoende is en dat hypothesen die met nieuwe data-analysetechnieken worden gegenereerd, ook worden getest.

5 Gewenste uitkomsten van een programma ‘actiegericht meten’

Diverse belanghebbenden hebben diverse wensen. Dat geldt ook in de waterwereld. In het proces van het opstellen van deze routekaart zijn de wensen en behoeften van verschillende groepen stakeholders tijdens workshops en interviews geïnventariseerd. Dit heeft laten zien dat de impactambities, zoals omschreven in Hoofdstuk 1, breed worden gedragen. Ook op het niveau van de ‘outcomes’ van de innovatieroutes – dat wat als gevolg van een programma na 5 tot 10 jaar bereikt zou moeten zijn – is sprake van grote eensgezindheid. Hoewel de technische wensen per stakeholdergroep kunnen verschillen, is er overeenstemming over de overkoepelende behoeften en knelpunten.

Hieronder volgen ter illustratie enkele voorbeelden van wensen vanuit verschillende stakeholder-groepen. Daarna wordt een synthese gepresenteerd van de gewenste outcomes van een innovatieprogramma voor ‘actiegericht meten ten behoeve van waterkwaliteitsbeheersing’.

Voorbeeld – Waterbeheer en Drinkwater

Voor deze gebruikersgroep, bestaande uit onder meer waterschappen, drinkwaterbedrijven en hun laboratoria, is beheersen en controleren van waterkwaliteit één van de primaire taken. Ze is vertrouwd met het organiseren van monitoringscampagnes in oppervlakte- en grondwater, en er wordt gebruikgemaakt van zowel laboratoriummetingen als on-site en in situ metingen voor processturing

op waterzuiveringen. Vanuit deze gebruikersgroep werden met name wensen aangedragen op het gebied van meettechnologie die toegepast kan worden bij het kiezen van interventies om oppervlakte- en grondwaterkwaliteit te verbeteren en voor het bewaken van processen en infrastructuur voor drinkwater. De wensen gaan specifiek om het beter en doelgerichter kunnen inzetten van bestaande interventies, zoals vergunningverlening of zuiveringsprocessen.

Een veelgenoemd probleem vanuit deze sector is het beperkte inzicht in bronnen van, in het bijzonder organische, (micro)verontreinigingen. Met name emissies vanuit puntbronnen in land- en tuinbouw en industrie zijn momenteel onvolledig in kaart gebracht, en de huidige methodieken zijn ongeschikt om dit inzicht te verbeteren. Voor de verbetering van de waterkwaliteit richting de KRW-doelstellingen is aanpak van emissiebronnen, middels vergunningverlening en handhaving, een belangrijke stap. Daartoe ontbreekt echter het meetinstrumentarium. Industriële chemicaliën, bestrijdingsmiddelen en PFAS zijn veelgenoemde doelparameters waarvoor kostenefficiëntere meetoplossingen gewenst zijn.

Vanuit de drinkwaterbedrijven die oppervlaktewater gebruiken is een vergelijkbare behoefte gesignaleerd. Deze bedrijven maken gebruik van geavanceerde monitoring om de kwaliteit van het in te nemen water te controleren en bij het optreden van een verontreiniging de inname te kunnen staken. Deze monitoring berust nu nog ten dele op

laboratoriumanalyses. Dit geldt in het bijzonder voor de zogenoemde non-target screening; een generieke screening, waarbij zoveel mogelijk bekende én onbekende stoffen worden gemeten. Het breder kunnen inzetten van dergelijke geavanceerde bepalingen zal zorgen voor een betere bewaking van het ingenomen water. Dit is van groot belang in het licht van een nog steeds toenemend aantal verontreinigende stoffen van humane oorsprong en de verwachte verslechtering ten gevolge van klimaatveranderingen, die zal leiden tot periodiek lagere afvoer in de oppervlaktewateren en daarmee tot hogere concentraties van verontreinigingen.

Een andere veel benoemde behoefte is het kunnen bepalen van nutriëntenconcentraties tot in de haarvaten van het watersysteem. Nutriënten zijn van groot belang voor de ecologische toestand van waterlichamen, en komen in het water via zowel diffuse als puntlozingen. Om de emissies te kunnen opsporen zijn fijnmazige metingen nodig, ook in kleinere wateren. Hoewel er diverse oplossingen zijn voor het bepalen van een deelverzameling van de relevante nutriënten, is nog geen oplossing beschikbaar die zowel de relevante stikstof- als fosforverbinding kan meten en kostenefficiënt genoeg is om grootschalig te worden ingezet. Het kunnen meten van fosfaat, nitraat en ammonium kwam dan ook vaak als wens naar voren.

Een laatste voorbeeld dat werd benoemd is het monitoren van de verwijdering van organische microverontreinigingen in de waterzuivering. In het

bijzonder de verwijdering van PFAS in de drinkwaterzuivering is hierbij van belang. Momenteel wordt ingezet op het gebruik van actief kool voor de adsorptie van PFAS. Echter, de kool raakt snel verzadigd en moet dan worden geregenereerd; een energie-intensief en kostbaar proces. Het kunnen volgen van de mate van verzadiging van de kool, en daarmee het voorkomen van onnodig vroege regeneratie, is een sterk gehoorde wens.

Ook bij natuurbeheerders staan real-time metingen en informatievoorziening hoog op de wensenlijst. Zij zijn voor informatie over de kwaliteit van waterlichamen afhankelijk van andere organisaties en merken dat er te weinig communicatie is tussen de verschillende actoren in de meetketen. Daardoor komen metadata niet boven water en blijven (vervolg)vragen onbeantwoord.

Voorbeeld – Land- en Tuinbouw

Een ander voorbeeld komt voort uit de gebruikersgroep van de glastuinders. Als ondernemers snel terugkoppeling krijgen van de monitoringsresultaten van grond- en oppervlaktewater in hun regio, kunnen zij passende maatregelen nemen om de emissie van bijvoorbeeld (specifieke) gewasbeschermingsmiddelen te voorkomen. In de glastuinbouw is veel informatie beschikbaar over welke gewasbeschermingsmiddelen gebruikt (mogen) worden voor verschillende teelten. Dit is belangrijke informatie die in een expertsysteem kan worden ingezet voor het interpreteren van gemeten actuele data en het plagen interventies. Het kader 'Tuinders willen sneller

en meer inzicht in waterkwaliteit' geeft hier meer achtergrondinformatie over.

In de Handreiking Gebiedsgerichte Terugkoppeling [18], opgesteld door CLM Onderzoek en Advies, dat onder andere is geïnspireerd op ervaringen van tuinders, staan diverse adviezen voor het verbeteren en beheersen van de waterkwaliteit. Voorbeelden zijn: het verzamelen van informatie over handelingsperspectieven voor agrariërs, het actualiseren van de manier van terugkoppelen van informatie over de kwaliteit van waterlichamen (eventueel met een dashboard en/of geografisch informatiesysteem, GIS), en directe verwijzing naar verplichtingen om tot actie over te gaan. Uit het advies blijkt echter ook dat aan enkele voorwaarden voor implementatie nog niet is voldaan. In het kader van het project Nutriëntenmaatregelen van de Kennisimpuls Waterkwaliteit is wel al een geografische database (kaart)⁹ ontwikkeld die per perceel aangeeft welke maatregelen nuttig zijn om de waterkwaliteit te verbeteren. Het ontbreekt echter vooralsnog aan actuele informatie over de waterkwaliteit op dit fijnmazige niveau. Zo zijn er nog veel analyses die in laboratoria worden uitgevoerd, waardoor near-real-time rapportage moeilijk is. Ook ontbreekt een grootschalig en eenduidig informatiesysteem dat informatie algemeen toegankelijk maakt en zijn er geen goed beschikbare overzichten van handelingsopties en hun effectiviteit in verschillende situaties.

Voorbeeld – Industrie

De industrie is niet een eenduidige groep bedrijven. Er zijn bedrijven die lozen op oppervlaktewater of riolering, bedrijven die water kunnen hergebruiken of dat niet kunnen, bedrijven die voor hun productie afhankelijk zijn van lozingsvergunningen en bedrijven die dat niet zijn, bedrijven die oppervlaktewater of drinkwater innemen en bedrijven die water gebruiken om te koelen, als productiemedium of als grondstof. Het is kortom niet eenvoudig een eenduidige wens van de industrie op te tekenen. Hierna volgen enkele voorbeelden van wensen van (groepen van) industriële bedrijven.

Bij een groot aantal bedrijven is behoefte aan een zuivere verdeling van de emissieruimte en snelle bijbehorende vergunningverlening. In de huidige praktijk duurt vergunningverlening door het bevoegd gezag vaak lang. Een complicerende factor is gebrek aan inzicht in de oorsprong van verontreinigingen. Veelal wordt gesproken van zogenoemde diffuse bronnen, maar vaak gaat het in zulke gevallen om een verzameling van onbekende puntbronnen. Bronidentificatie kan helpen om een beter systeeminzicht te verkrijgen, zoals een totaalbeeld van emissiebronnen. In combinatie met snelle beschikbaarheid en vergelijking van gemeten waterkwaliteitsparameters, kan hiermee snel worden voorzien in een goede verdeling van de emissieruimte. De wens om verontreiniging te kunnen toewijzen aan individuele bedrijven is recent door een aantal bedrijven kenbaar gemaakt aan de Tweede Kamer [19] en ook in een position paper over de KRW [20].

⁹ www.maatregelen-op-de-kaart.nmi-agro.nl/

Tuinders willen sneller en meer inzicht in waterkwaliteit

In Zuid-Holland zijn in het kader van het programma 'De emissieloze kas' zogenoemde watercoaches actief die tuinders helpen de waterkwaliteit in hun omgeving te verbeteren. Doel is om de emissie van gewasbeschermingsmiddelen en nutriënten tot (bijna) nul te reduceren.

De watercoaches bezoeken tuinders en gaan samen met hen op zoek naar manieren om de

emissies op het bedrijf terug te brengen. Daarbij maakt de watercoach zoveel mogelijk gebruik van recente meetgegevens over de waterkwaliteit. Een grote uitdaging hierbij is dat de meetgegevens meestal niet actueel zijn. Ze zijn minimaal een maand, tot soms meer dan een jaar, oud. Een ander probleem is dat de metingen worden uitgevoerd op de schaal van een polder, waardoor het heel moeilijk is om te achterhalen waar verontreinigingen precies vandaan komen, laat staan om voor een bedrijf een oplossing voor de emissie te vinden. Daarom gebruiken sommige watercoaches

hand-held meetapparatuur waarmee zij op locatie bijvoorbeeld nitraatconcentraties in het water kunnen meten. Dat werkt, maar biedt geen oplossing voor gewasbeschermingsmiddelen en is arbeidsintensief en afhankelijk van de beschikbaarheid van de watercoach.

Voortkomend uit de genoemde problematiek, hebben tuinders en watercoaches een sterke behoefte aan betaalbare en robuuste sensoren in en om hun bedrijf. Opgemerkt moet worden dat de uitslag van laboratoriumanalyse voor het bepalen van nutriëntenconcentraties na twee dagen beschikbaar is. Voor de bepaling van de concentratie van gewasbeschermingsmiddelen duurt het vaak nog langer (~ 4 weken).

Ook hebben tuinders behoefte aan een datasysteem waarin de gemeten data worden bijgehouden en snel gepresenteerd. Dit helpt de identificatie van de bron van verontreinigingen (wanneer zich bijvoorbeeld onverhoopt lekkages voordoen).

In een verder toekomstbeeld zouden de adviezen van de watercoaches kunnen worden opgenomen in een digitaal expertsysteem (bijvoorbeeld een *digital twin*), zodat zij zich meer kunnen bezighouden met de gecompliceerde gevallen. Eenvoudige, vaak voorkomende adviezen, kunnen dan op basis van de gemeten data door het expertsysteem worden gegeven.



Bron: Glastuinbouw Nederland

Een andere wens die deze bedrijven aangeven is het hanteren van een 'no-net-addition'-principe voor stoffen in hun restlozing die al aanwezig waren in het ingenomen water. Zij geven aan dat meetplannen met input/output vergelijking en monitoringsprogramma's per stof de toepassing van zo'n principe kunnen faciliteren. In het position paper verwoorden zij eveneens de behoefte aan landelijke coördinatie en regie op de ontwikkeling van analysemethoden. Dit moet de in de praktijk onwerkbaar situatie van detectielimieten die hoger zijn dan de normen verbeteren.

Veel bedrijven zien de uitvoering van bemonstering, metingen en dataverwerking als een belemmering. Het meten van waterkwaliteit zou veel minder arbeids- en kostenintensief moeten zijn en snel – in plaats van met vertraging – inzicht moeten geven. Een andere veelgehoorde behoefte is inzicht in de effectiviteit en (economische) efficiëntie van interventies voor waterkwaliteitsbeheersing. De meting van een (te hoge) concentratie van een contaminant zou vertaald moeten worden naar een zo compleet mogelijk overzicht van handelingsopties en uiteindelijk naar een handelingsperspectief (bijvoorbeeld via een kosten-batenanalyse van interventies).

Op het gebied van afvalwaterzuivering zouden enkele partijen graag vuilvracht-gestuurde dosering voor waterbehandeling zien, in plaats van flow-gebaseerde dosering. Dit helpt overdosering te voorkomen. Voor dit type processturing is actuele sensinginformatie nodig.

Overkoepelende wensen

Een algemene observatie is dat beschikbare gemeten data niet voor iedereen begrijpelijk zijn. Er is relatief veel expertise nodig om de gemeten data te interpreteren. Hierdoor wordt de vertaling in actie om de waterkwaliteit te verbeteren natuurlijk ernstig belemmerd. Hieraan gerelateerd is ook de terughoudendheid om ongevalideerde of nog-niet gevalideerde data te communiceren, die wel degelijk nuttig kunnen zijn – bijvoorbeeld voor een snelle beoordeling ten behoeve van inschatting van de effectiviteit van interventies. Als het betrouwbaarheidsniveau van data (en de betekenis daarvan) wordt meegenomen in de communicatie, kan dit onrust voorkomen en de waarde van de data verhogen.

Gerelateerd aan de betrouwbaarheid van data, inclusief de beleving daarvan bij gebruikers, is de mate waarin *in situ* metingen wettelijk worden voorgeschreven of geaccepteerd. Die is heel laag. Vaak is monstername nog wettelijk voorgeschreven. Dit staat de gewenste overgang van laboratorium-analyse naar *in situ* analyse en (*near*) *real-time* informatievoorziening in de weg. Er is dus een sterke behoefte aan sensing- of meettechnologie die goed genoeg is om geaccepteerd te worden in het kader van Europese en nationale meetverplichtingen.

Vanzelfsprekend is het voor het bereiken van de benodigde schaalgrootte essentieel dat de gebruikte meet- en informatievoorzieningssystemen kostenefficiënt zijn. Dit stelt eisen aan de aanschaf- en gebruikskosten en aan de robuustheid van apparatuur en software.

Gewenste outcomes innovatieprogramma

Samenvattend komen de gewenste outcomes van een innovatieprogramma voor 'actiegericht meten ten behoeve van waterkwaliteitsbeheersing' neer op de **integratie van oplossingen voor meting**, dataverwerking, informatievoorziening, **databaseer**, **digital twinning** en **vertaling naar handelingsperspectieven** die:

- worden vertrouwd door de verschillende gebruikersgroepen, van overheden tot bedrijven en individuen;
- omgevingscompatibel zijn. Dit geldt zowel voor de meetinstrumentatie (hardware) als voor de informatiesystemen (software en user interfaces);
- kostenefficiënt en robuust zijn, zodat zowel de aanschafkosten als de *cost of ownership* laag zijn;
- worden gebruikt om momentane (*near real-time*) informatie over lokale waterkwaliteit te verkrijgen en te vergelijken met historische informatie;
- goed toegankelijk zijn en naast gemeten data ook informatie verschaffen over de meetmethode die gebruikt is om de meetdata te genereren;
- kunnen worden gebruikt om advies te geven over meetmethoden voor specifieke toepassingen;
- worden gebruikt om verontreinigingsbronnen te identificeren. Dit kan eisen met zich meebrengen ten aanzien van drone-compatibiliteit of geografisch gedistribueerde meetinstrumentatie;
- worden gebruikt voor advies ten aanzien van interventie-opties of investeringen en voorspelling geeft van hun effectiviteit;
-

- gebruik van relevante gegevens of modules voor bijvoorbeeld proces-sturing mogelijk maken voor een grote en diverse groep van gebruikers zoals telers, boeren, waterbeheerders, natuurbeheerders, zuiveringstechnologen, operators, etc.;
- worden gebruikt voor monitoring van de effectiviteit van interventies;
- expertsystemen, zoals *digital twins*, bevatten en actueel houden;
- systeembegrip genereren, zowel op het gebied van contact tussen waterlichamen als op het gebied van relaties tussen waterkwaliteitsparameters;
- internationaal compatibel zijn, zodat grensoverschrijdende waterkwaliteitsbeheersing wordt vergemakkelijkt.

Het volgende hoofdstuk beschrijft wat ervoor nodig is om een systeem te ontwikkelen dat aan de bovengenoemde wensen en systeemeisen voldoet.



6 Uitwerking van de innovatieroutes

Uit voorgaande hoofdstukken blijkt dat er behoefte is aan een systeem dat snel, betrouwbaar en betaalbaar informatie verschaft over veranderingen in de waterkwaliteit op plaatsen die de gebruiker belangrijk vindt. Ook vragen stakeholders om een expertsysteem dat advies kan uitbrengen over de te verwachten effecten van interventie-opties. Kortom: er is behoefte aan een snelle en betrouwbare meet-informatie-actie-monitoring-keten. Figuur 5 geeft deze keten weer. Hier zijn (in grijs), bij wijze van indicatie van de complexiteit, voorbeelden gegeven van variabelen en componenten die daarbij horen. Uit een inventarisatie onder stakeholders kwam naar voren dat op een aantal plaatsen in deze keten extra innovatie of coördinatie nodig is. Evidente knelpunten zijn: *in situ* meting, dataverzameling, -combinatie en -toegankelijkheid en vertaling naar handelingsperspectief.

Dit hoofdstuk beschrijft wat ervoor nodig is om een snelle en betrouwbare meet-informatie-actie-monitoring-keten te ontwikkelen voor 'actiegericht meten'.

Waardengedreven systeemeisen

Voor acceptatie en gebruik van actiegerichtesensingtechnologie moeten de waarden van de gebruikers worden gerespecteerd. Privacy, autonomie, veiligheid en juistheid zijn daarom essentieel voor impact.

Voor gebruik van een systeem van metingen, advies en monitoring is het van belang dat zo'n systeem voldoet aan de waardengedreven eisen vanuit de

gebruikers. Bij de ontwikkeling van deze routekaart zijn workshops gehouden waarin aandacht is besteed aan de waarden die voor de gebruikersgroepen belangrijk zijn. De waarden die hierbij zijn genoemd, kunnen zowel een stimulerende als een remmende werking hebben op de acceptatie van vernieuwende technologie en systemen. In het geval van een stimulerende werking kunnen tijdens de ontwikkeling versterkende maatregelen worden genomen. Bij een remmende werking zullen mitigerende veranderingen moeten worden geïmplementeerd die de bezwaren voor acceptatie wegnemen. De volgende waarden blijken van groot belang:

Autonomie en Privacy. Deze waarde heeft twee kanten. Enerzijds wil de gebruiker niet door de metingen worden gedwongen tot het maken van bepaalde keuzes. Anderzijds wil de gebruiker voor de meetgegevens waar deze zelf eigenaar van is kunnen beslissen of die gegevens algemeen zichtbaar en herleidbaar worden of slechts voor de eigenaar zichtbaar zijn.

Veiligheid. Hier gaat het erom dat het systeem is beveiligd tegen malafide interventies van gebruikers of externen. In combinatie met de waarde 'juistheid' betekent dit ook dat verschillende vertrouwensniveaus van meetresultaten moeten kunnen worden toegekend.

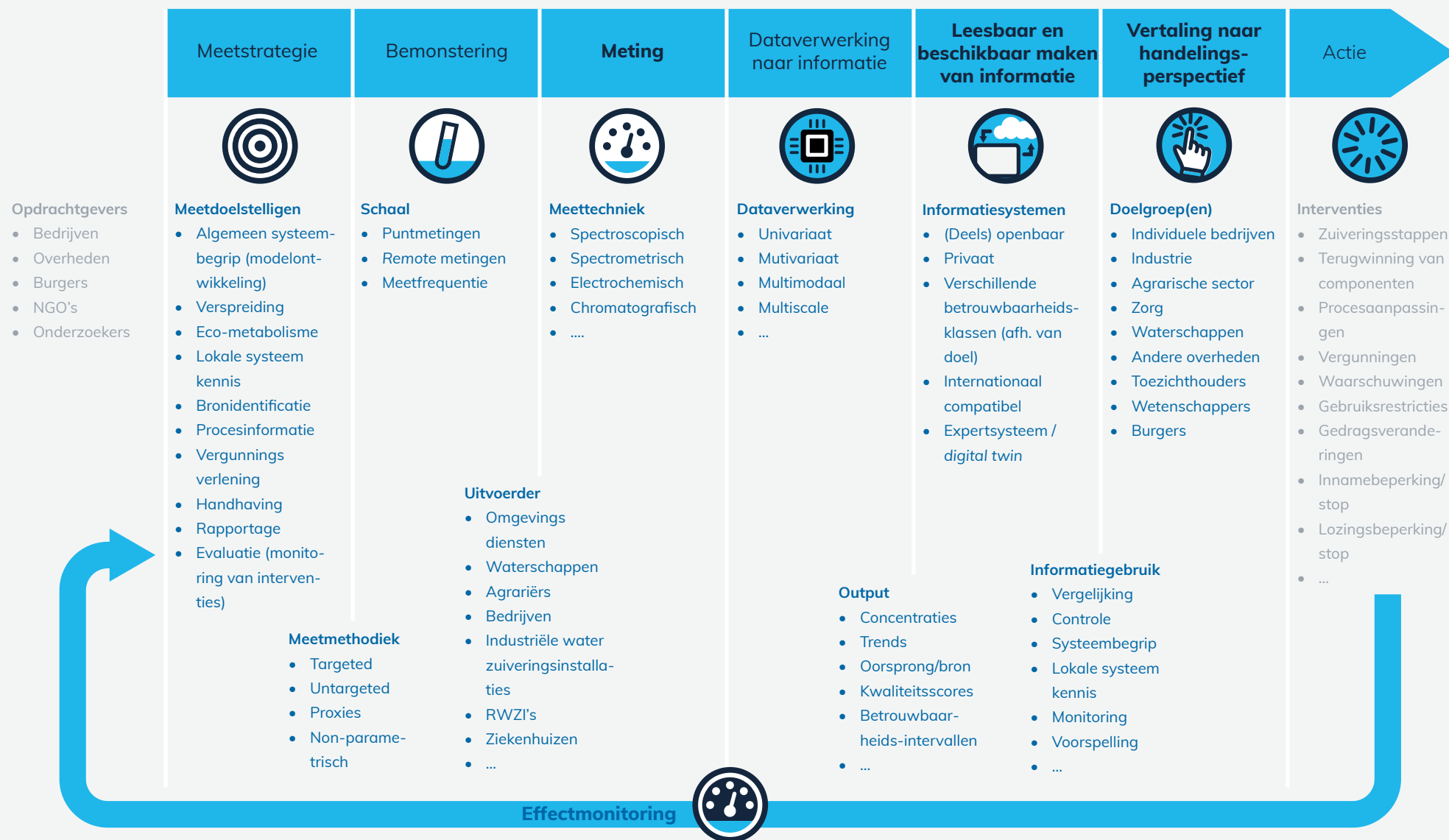
Eerlijkheid/Transparantie/Juistheid. Bij deze waarden gaat het er allereerst om dat meetgegevens en andere uitkomsten gevalideerd zijn. Ook moeten de uitkomsten (informatie, systeeminzicht, etc.)

een eerlijke weergave van de werkelijkheid geven, bijvoorbeeld bij bronidentificatie. De toepassing van het systeem moet evidence-based beleid faciliteren.

Hieruit volgen belangrijke functionele en vormgevingseisen die in de ontwikkelfase nader moeten worden gespecificeerd. Daarvoor is interactie met de gebruikersgroepen essentieel. De volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen op het gebied van beleid, technologie en menselijke interactie zijn tijdens raadpleging van gebruikersgroepen geïdentificeerd:

- Certificering van gebruikte sensingtechnologie
- Eenvoudige data-ontsluiting
- Open data-infrastructuur
- Privacybescherming
- Eigenaarschap van data en onderzoeksuitkomsten
- Goede visualisatie, afgestemd op de gebruikersgroep
- Compatibiliteit met bestaand beleid
- Afstemming tussen regio's en landen
- Communicatie van urgentie
- Delen van succesverhalen (voorbeelden) naar belangengroepen
- Ontwikkeling in proeftuinen

Meet-informatie-actie-monitoring-keten voor 'actiegericht meten en monitoring'



Figuur 5 : Meet-informatie-actie-monitoring-keten voor 'actiegericht meten', met in blauw (niet uitputtend) bijbehorende variabelen en componenten.

Stakeholder-inclusief innovatieproces

Tijdig en met de juiste intensiteit betrekken van de stakeholders verhoogt de doelmatigheid van het innovatieprogramma. De optimale manier waarop dat plaatsvindt verschilt per stakeholdergroep en sector. Het innovatieprogramma moet daarop worden ingericht.

Een (technische) ontwikkeling is pas een innovatie op het moment dat er economische en/of maatschappelijk waarde mee wordt toegevoegd. In dat perspectief is het van belang de eindgebruiker en eventuele andere stakeholders tijdig in het innovatieproces te betrekken. Als dat goed gebeurt, heeft het drie effecten: het zorgt voor focus op het einddoel, het vergemakkelijkt het maken van keuzes gedurende het ontwikkelproces en het zorgt voor versnelde acceptatie door de beoogde eindgebruiker(s).

Voor actieve deelname van gebruikers en andere stakeholders aan het innovatieproces zijn verschillende mogelijkheden. Op een hoger abstractieniveau is daarmee al begonnen bij de totstandkoming van deze routekaart. Dit heeft geresulteerd in de identificatie van belangrijke waarden en technische systeemeisen voor stakeholders, zoals beschreven in dit hoofdstuk. Voor de meer operationele samenwerking tussen ontwikkelaars en gebruikers, kan gebruik worden gemaakt van publiek-private samenwerkingsprojecten, fieldlabs en proeftuinen.

In veel gevallen zijn fieldlabs en proeftuinen sector-specifiek. Dit kan betekenen dat innovatie-uitkomsten verschillen in vormgeving van de presentatie van resultaten van metingen. Ook kan de manier waarop de metingen worden gedaan tussen sectoren verschillen. Dit kan te maken hebben met de matrix waarin wordt gemeten of met vereisten ten aanzien van de mobiliteit van een sensor of meetinstrument. Op deze manier geeft de interactie met de eindgebruiker richting aan de innovatie. Op het niveau van de eigenlijke meting van parameters is het natuurlijk aanbevelenswaardig dat ervaringen vanuit de verschillende gebruikssectoren worden gedeeld om zodoende inefficiënties in het innovatieproces te minimaliseren en best practices te kunnen implementeren. Daarom moet contact tussen fieldlabs, proeftuinen en projecten door een overkoepelend innovatieprogramma worden gefaciliteerd. De vraag wat de beste manier is om contact tussen ontwikkelaars en eindgebruikers te faciliteren kan mogelijk zelfs onderwerp van sociaalwetenschappelijk onderzoek zijn.

Aangezien vergunningverleners en toezichthouders ook eindgebruikers zijn en er sterke behoefte is aan snellere en meer voorspelbare vergunningverlening, moet deze toepassing ook een speerpunt van innovatie zijn. Zogenaemde *regulatory sandboxes*¹⁰ kunnen daartoe een instrument zijn.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Publiek-private samenwerkingsprojecten
- Fieldlabs
- Proeftuinen
- Regulatory sandboxes
- Het delen van best practices
- Een overkoepelend innovatieprogramma
- Publiek-private samenwerkingsprojecten
- Sociaalwetenschappelijk onderzoek naar interactie tussen ontwikkelaars en eindgebruikers

Van meting naar informatie naar actie – leesbaarheid en prikkels voor interventies

Vertaling van meetdata naar begrijpbare informatie en actie is maatwerk. Onderzoek en pilots zijn nodig om dit optimaal in te richten.

Vanwege de grote diversiteit aan gebruikers is het van belang dat meetresultaten op de juiste manier worden vertaald in voor de gebruikers begrijpbare informatie. Het gaat hier om de zogenoemde 'leesbaarheid' van meetresultaten. Aangezien opleiding, achtergrond en belang van de doelgroepen sterk kunnen verschillen, is optimalisatie van de weergave van de informatie een belangrijke succesfactor. Meetresultaten kunnen bijvoorbeeld worden weergegeven in getallen (met of zonder betrouwbaarheidsinterval), staafdiagrammen, kleurcodes, woorden,

¹⁰ Een *regulatory sandbox* is een gecontroleerde, veilige omgeving waarin deelnemers innovatieve producten, diensten of bedrijfsmodellen in een 'live' omgeving onder toezicht kunnen testen, zonder dat ze direct aan alle geldende regels hoeven te voldoen. Het doel van *regulatory sandboxes* is dat regelgevers leren hoe ze regelgeving moeten vormgeven en bedrijven leren om aan de regelgeving te voldoen.

of eenvoudige stoplicht-analogieën (zie Figuur 6). In de eerdergenoemde fieldlabs en proeftuinen kan aan dit aspect aandacht worden besteed, eventueel ondersteund door breder opgezet onderzoek naar leesbaarheid van meetdata.

Zeker in het geval van de complexe waterwereld zijn vaak meerdere verschillende interventies mogelijk. Vanzelfsprekend is niets doen soms ook een optie. Zoals eerder aangegeven is systeembegrip instrumenteel in het voorspellen van de uitkomsten van verschillende handelingsopties. Omdat van stakeholders niet kan worden verwacht dat zij de volledige waterwereld begrijpen, inclusief de geografische verschillen daarin, is centrale beschikbaarheid van een expertsysteem (decision support system of digital twin) gewenst. Zo'n expertsysteem kan, mits goed getraind en gevalideerd, uitrekenen wat de waarschijnlijke uitkomsten van de handelingsopties zijn. Ook deze informatie moet worden vertaald in voor de gebruiker herkenbare en relevante grootheden of terminologie. Daarnaast moet het expertsysteem de mate van toepasbaarheid op de individuele casus aangeven. Een koppeling met het belang van de gebruiker zal de mate van succes van het vertalen van meetgegevens naar actie sterk vergroten. Mogelijke uitkomsten zijn: 'U zal hiermee (waarschijnlijk) aan de vergunningseisen voldoen', 'De ecologische kwaliteit van het oppervlaktewater wordt hierdoor positief beïnvloed', een 'stoplicht' dat van rood naar oranje of groen gaat, 'Verwachte besparing op verontreinigingsheffing: € 20.000', of: 'De schade aan het lokale ecosysteem wordt hierdoor met € xxxx tot € yyyy verminderd'. Deze laatste twee voorbeelden lijken vergezocht, maar

raken voor veel doelgroepen wel de juiste snaar. Dergelijke ontwikkelingen kunnen mogelijk ook bijdragen aan de (financiële) afspraken die gemaakt gaan worden tussen rioolwaterzuiveraars en industriële partijen die op riolen lozen.

Ten behoeve van de bewustwording bij verschillende gebruikers van drink-, grond-, en oppervlaktewater is het instrumenteel om waarde te kunnen verbinden aan de kwaliteit van water. Hierbij gaat het niet alleen om de economische waarde die

doorgaans wordt uitgedrukt in euro's, maar ook om de maatschappelijke waarde voor de kwaliteit van ecosystemen, biodiversiteit, gezondheid, etc. Hiervoor zouden algemeen geaccepteerde (reken) eenheden moeten worden ontwikkeld en gebruikt. Vanzelfsprekend zal systeembegrip bij gebruikers bijdragen tot actiebereidheid. In dat verband kan gamification een hulpmiddel zijn voor waterkwaliteitsbeheersing, in het bijzonder als deze gebruikmaakt van gevalideerde resultaten en ervaringen.



Figuur 6 : Voorbeelden van gebruikersgerichte weergaven van meetgegevens

De uitdrukking van maatschappelijke waarde in (reken)eenheden helpt de ontwikkeling daarvan.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Onderzoek naar leesbaarheid van meetdata
- Centrale beschikbaarheid van een expertsysteem
- Het belang van de gebruiker meenemen in de vertaalslag van data naar handelingsperspectief
- Ontwikkeling van rekeneenheden voor economische en maatschappelijke waarde van waterkwaliteit
- Gamification voor waterkwaliteitsbeheer

Meettechniek algemeen

Gevoeligheid, juistheid, robuustheid en juridische borgbaarheid zijn belangrijke vereisten voor nieuwe waterkwaliteitssensing.

Bij de keuze voor (ontwikkeling van) meettechnieken staat de doelstelling van de meting centraal. Voor vergunningen moeten vaak concentraties van specifieke stoffen worden gerapporteerd. Daarbij is het belangrijk dat specifieke en goed gekalibreerde technieken worden ingezet en dat interferenties met andere soortgelijke stoffen worden voorkomen. Soms zijn daarvoor, voorafgaand aan de eigenlijke detectie, scheidingstechnieken nodig. In het geval van het meten van stofklassen kunnen scheidingen wel eens achterwege worden gelaten. Voor meettechnieken ten behoeve van vergunningen en acceptatie in het kader van Europese en nationale meetverplichtingen is het juridische aspect belangrijk. Dit is

verbonden aan de juistheid en robuustheid van de gebruikte meettechniek. Als nieuwe meettechnieken en -methoden worden ontwikkeld, moeten deze voor dat soort toepassingen ook juridisch borgbaar zijn. Opgemerkt moet worden dat juridische borging niet alleen een inspanning vereist in de ontwikkeling van de meettechnologie, maar ook in de bevordering van acceptatie van nieuwe technologie door overheden.

Een algemene uitdaging bij het lokaal detecteren of meten van stoffen en stofklassen is respectievelijk de detectielimiet en de bepalingsgrens van een techniek. Veel technieken zijn simpelweg (nog) niet gevoelig genoeg om als, al dan niet mobiele en/of geminiaturiseerde, instrumentatie buiten een laboratorium te worden ingezet. De ontwikkeling en inzet van spectroscopische (fotonische) technieken, gecombineerde metingen en affiniteit-gebaseerde technieken zullen naar verwachting de mogelijkheden vergroten om betrouwbaar en met lage bepalingsgrenzen buiten het laboratorium te meten.

Een algemene uitdaging hierbij is het voorkomen van aanslag (*fouling*) op onderdelen die voor het functioneren van de instrumentatie belangrijk zijn. Dit verschilt vanzelfsprekend per technologie en is een belangrijk onderdeel van instrumentatie- en applicatieontwikkeling.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Faciliteren van de juridische borgbaarheid van meettechnieken en -methoden

- Optimaliseren van gevoeligheid, juistheid en robuustheid van meettechnieken en -methoden
- Ontwikkeling van spectroscopische meettechnieken
- Inzet van gecombineerde metingen
- Ontwikkeling van affiniteit-gebaseerde technieken
- Voorkomen van aanslag (*fouling*) bij *in situ* metingen

Opkomende stoffen en stofgroepen

In de toekomst zal waterkwaliteitsbeheersing vragen om meting van nieuwe stof(klass)en.

Veranderende inzichten en werkwijzen vragen om adaptiviteit van meettechnologie.

Voortschrijdende inzichten als gevolg van het steeds vaker voorkomen van (potentieel zorgwekkende) antropogene verontreinigende stoffen in water leiden tot steeds meer belangstelling voor het monitoren hiervan. Recente voorbeelden zijn perfluoralkylstoffen (PFAS) en micro- en nanoplastics (MNP). Logischerwijs zullen voor die stofklassen steeds meer rapportage-eisen komen en zal, naarmate meer kennis ter beschikking komt over de (eco) toxicologie, ook meer chemisch specifieke informatie worden gevraagd. Denk in het geval van PFAS aan ketenlengtes of functionele groepen en in het geval van MNP aan monomeertype en concentraties van uitlogbare stoffen (zie kadertekst). Sensing van dit soort stoffen en stofklassen kan dan ook worden gezien als een groeigebied dat vraagt om innovatieve technologie. Regelmatig contact tussen ontwikkelaars van beleid en onderzoekers van PFAS en micro- en nanoplastics komt snelle vertaling van

inzichten naar normen ten behoeve van waterkwaliteitsbeheersing ten goede. Tenslotte moet worden opgemerkt dat 25 van de 45 prioritaire stoffen van de KRW in oppervlaktewateren (met de huidige technologie) soms of vaak niet toetsbaar zijn [3]. De uitdaging hierbij is dus ook om de juiste meettechnologieën te selecteren en/of door te ontwikkelen die nodig zijn om essentiële informatie te verschaffen voor de waterkwaliteitsbeheersing. Dit vereist continu zicht op het onderzoeksveld van opkomende vervuilingen en bijbehorende meetinnovaties.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

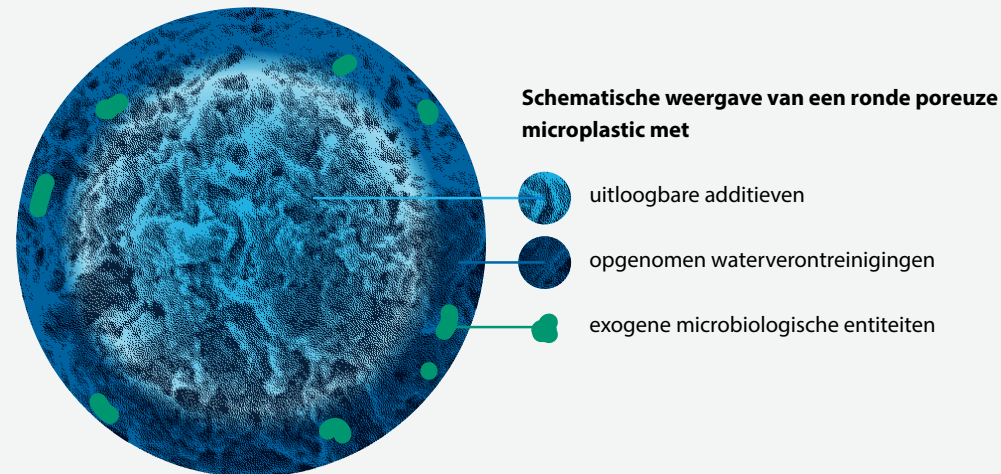
- Poortwachtersfunctie voor nieuwe meetprincipes en -methoden voor bepaling van concentratie en speciatie van PFAS
- Poortwachtersfunctie voor nieuwe meetprincipes en -methoden voor bepaling van concentratie en speciatie van micro- en nano-plastics
- Prioritering en ontwikkeling van metingen op de meest toxische varianten van PFAS en MNP's

Micro- en nanoplastics; een 'nieuw' soort vervuiling

Uit recent onderzoek blijkt dat MNP op veel plaatsen in mensen en dieren terecht kunnen komen en ook verschillende reacties van het immuunsysteem kunnen uitlokken. In welke mate die reacties schadelijk zijn en voor welke MNP dit geldt, is onderwerp van verder onderzoek, bijvoorbeeld in het onderzoeksprogramma *Momentum, Microplastics and Human Health Consortium*. Het is waarschijnlijk dat de toxiciteit van een plasticdeeltje een samenspel is van een veelheid aan factoren: de grootte, de vorm, de bulksamenstelling (monomeren), het

vermogen om verder te worden opgebroken tot kleinere deeltjes, de aanwezigheid van uitloogbare stoffen (bijvoorbeeld weekmakers), de opname van verontreinigingen in de corona en het vermogen om als vehikel van pathogenen op te treden.

In het kader van het Momentumprogramma is gewerkt aan een raamwerk voor Environmental Quality Standards (Milieukwaliteitsstandaarden) voor MNP, die wenselijke niveaus, maximaal toegestane niveaus of interventieniveaus definiëren. Op basis van de uitkomsten daarvan kunnen nadere wensen en eisen ontstaan voor meting van MNP in water.



Meer dan chemische informatie

Het koppelen van (geïntegreerde) chemische aan ecologische data van waterkwaliteit helpt bij het stellen van prioriteiten in waterkwaliteitsbeheersing.

Voor waterkwaliteitsbeheersing is het van belang ook andere uitkomsten dan concentraties van specifieke stoffen te kennen. Biodiversiteit is daarvan een voorbeeld. Veelal worden op soortentelling gebaseerde methoden toegepast. Deze zijn echter tijdrovend en kosten veel inspanningen. Innovatie op dat gebied kan zorgen dat informatie over de biodiversiteit sneller en met minder inspanning beschikbaar komt. Denk hierbij aan het inzetten van op afstand uit te lezen observatie-apparatuur of het meten van e-DNA. Eerder in dit hoofdstuk is al gerefereerd aan het belang van (eco)toxicologische kennis over specifieke stoffen en stofklassen. Voor het identificeren en beheersen van mengseltoxiciteiten, of de som der delen van de verontreiniging, zal koppeling van ecologische data aan andere, chemische en fysische, parameters, behulpzaam zijn. Zo kan bijvoorbeeld de relatie tussen chemische status en ecologische status van oppervlaktewater worden onderzocht en kunnen prioriteiten worden gesteld in de aanpak van verontreinigingen. Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Op afstand uitleesbare observatie-apparatuur voor soortenbepaling
- Inzet van e-DNA voor soortenbepaling/monitoring
- Koppeling van ecologische data aan chemische en fysische data

Schaal van de metingen

Naast puntmetingen is ook remote sensing een belangrijk gereedschap. Hiervoor zijn extra inspanningen nodig op het gebied van ontwikkeling van sensingtechnologie en dataverwerking.

Een andere factor die van belang is bij de keuze voor (ontwikkeling van) meettechnologie, is de grootte van het waterlichaam of de waterstroom waarover informatie gewenst is. In het geval van het meten aan een per pijp verplaatste afvalwaterstroom, kan meting op een enkele plaats uitkomst bieden. Bij grote oppervlakte- of grondwaterlichamen is de plaats waar wordt gemeten van invloed op het meetresultaat. In sommige gevallen kan dit goed worden ondervangen door op verschillende plekken te meten en vervolgens te middelen. De beschikbaarheid over mobiele drone-gebaseerde instrumenten is daarbij een uitkomst. Dit geldt overigens ook voor bronidentificatie. Drones die zijn uitgerust met specifieke meetapparatuur kunnen worden gebruikt om tegen de gradiënt van een verontreiniging in te varen totdat de bron is geïdentificeerd. Vanzelfsprekend kan dit ook met een aantal vaste meetpunten, maar die aanpak vraagt dan wel om extra instrumentatie. Een alternatieve benadering is het meten op afstand, zogenoemde *remote sensing*. Met deze methode treedt vanwege de afstand al middeling op, of kan zelfs een beeld worden verkregen van gradiënten in de gemeten waarden. Veelal zijn de vehikels die voor dergelijke metingen kunnen worden gebruikt, zoals drones, helikopters (zie kadertekst) en satellieten, wel beschikbaar, maar is de meettechnologie nog niet licht, energie-efficiënt of robuust genoeg voor deze toepassing. Koppeling van data, verkregen

met *remote sensing*, aan data die zijn verkregen met puntmetingen, kan behulpzaam zijn bij het genereren van systeembegrip en het ontwikkelen van kwaliteitsbepaling of monitoring met behulp van proxies.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Mobiele drone-gebaseerde instrumenten
- Uitbreiding van het aantal vaste meetpunten
- *Remote sensing*
- Koppeling van puntmetingen aan *remote sensing*-data
- Aandacht voor gewicht en energiebehoefte van mobiele meetmethoden

Multivariate data-analyse en Artificial Intelligence

Bij gebruik van kwalitatief hoge data en relevante metadata, mag worden verwacht dat de ontwikkeling van AI voor waterkwaliteitsbeheersing nieuw systeembegrip oplevert.

De toepassing van multivariate data-analyse en de ontwikkeling van kunstmatige intelligentie (Artificial Intelligence, AI) bieden toepassingsmogelijkheden voor waterkwaliteitsbeheersing, in het bijzonder wanneer het gaat om grote hoeveelheden data van verschillende aard. Zo kan AI helpen bij het ontwikkelen van hypothesen of modellen voor niet-lineair gedrag van verontreinigingen onder invloed van een complexe set van omgevingsfactoren en onderlinge afhankelijkheden. De identificatie van zogenoemde proxies voor bijvoorbeeld de chemische waterkwaliteit is daarvan een voorbeeld.

Ondergrondse verzilting meten vanaf een helikopter

Zoutconcentraties in waterlichamen kunnen worden bepaald door het meten van de elektrische geleidbaarheid. Deze parameter is een indicator van de aanwezige hoeveelheid ionogeen materiaal. Zo is een verhoogde geleidbaarheid een indicatie voor vervuiling met metalen of, in de buurt van de kust, voor het doordringen van zeewater. Voor de meting van elektrische geleidbaarheid is wel direct contact met het water nodig; de meetelektroden moeten in het water worden gestoken. Dit betekent dat het meten van de geleidbaarheid van grondwater lastig is.

Een alternatief voor het bepalen van (veranderingen in) zoutconcentraties in grondwater is remote sensing. Een voorbeeld hiervan is het onderzoek van TNO Geologische Dienst Nederland en Deltares, in samenwerking met provincies, waterschappen en waterbedrijven. De achtergrond hiervan is dat het in het kader van drinkwatervoorziening en weerbaarheid tegen klimaatverandering belangrijk is om te weten waar, hoe en hoever zoutwater in grondwaterlichamen doordringt. Met een grote 'hoepel' die onder een helikopter hangt, meten zij de terugkaatsing van uitgezonden elektromagnetische straling. Op die manier kunnen ze tot op 250 meter diepte verschillende grondlagen en het verschil tussen zout en zoet water zichtbaar maken. De metingen vinden plaats op tientallen



Bron: SkyTEM Surveys ApS

meters boven de grond, terwijl de helikopter langs een denkbeeldig patroon van 100-300 meter van elkaar verwijderde parallelle lijnen over het landschap vliegt. Zo maken ze een driedimensionale verziltingskaart van de gebieden waar ze ondergrond- en verziltingsinformatie

over willen hebben. Na data-acquisitie is nog wel veel dataverwerking en vergelijking met andere data nodig; het is immers een verkenningsproject. De eerste resultaten worden verwacht in 2027.

Vanzelfsprekend is de kwaliteit van de in AI gebruikte data bepalend voor de kwaliteit van de output van AI. Daarom is het van groot belang dat de kwaliteit van de metingen gegarandeerd is of dat op zijn minst het kwaliteitsniveau is aangegeven.

Mogelijk kan kunstmatige intelligentie gebruikt worden om informatie over chemische waterkwaliteit, ecologische waterkwaliteit en hydrologische dynamiek met elkaar in verband te brengen en op basis hiervan voorspellingen te doen over de ontwikkeling van de waterkwaliteit. Het kan nuttig zijn om daarvoor verschillende AI-agents te ontwikkelen en uiteindelijk met elkaar te laten communiceren ten behoeve van bijvoorbeeld digital twins. Een andere toepassing van generatieve AI is assistentie bij het vertalen van gemeten data in voor de gebruiker begrijpbare of aansprekende taal.

De bovengenoemde context van metingen, zoals met welk doel een meting is uitgevoerd of met welke methode, wordt van belang geacht bij de inzet van AI voor het ontdekken van potentiële verbanden. Welke metadata moeten worden meegenomen, kan per applicatie verschillen. Ondersteunend wetenschappelijk onderzoek is nodig om hierin inzicht te verschaffen.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Aandacht voor de kwaliteit van de in AI gebruikte data
- Inzet van generatieve AI op combinaties van chemische, ecologische en hydrologische data

- Ontwikkeling van AI agents ten behoeve van (modulaire) expertsystemen
- Inzet van generatieve AI voor vertalen van meetdata naar begrijpelijke taal
- Wetenschappelijk onderzoek naar het belang van metadata en context bij toepassing van AI

Data-opslag, -toegang en informatieverwerking

Bij de ontwikkeling van (centrale) informatiesystemen moet aandacht worden besteed aan de selectie van relevante metadata, onder andere ten behoeve van de indicatie van betrouwbaarheidsniveaus.

Met name op het gebied van openheid en privacy zullen balancerende maatregelen in de informatiesystemen moeten worden geïmplementeerd. Hierbij kan worden gedacht aan open-source data-aggregatie (OSDA). Een andere mogelijkheid is de toekenning van verschillende vertrouwensniveaus van ingebrachte data, afhankelijk van de gebruikte meettechnologie en de aanbieder van de gegevens. Zo kan ten behoeve van vergunningverlening en/of handhaving een ander vertrouwensniveau van data worden gebruikt dan voor een snelle indicatie van verandering of trend in een geselecteerde waterkwaliteitsparameter.

Voor de vergelijkbaarheid van data is het belangrijk om kennis te hebben over de betrouwbaarheid ervan. Deze bepaalt als het ware de waarde van de data. Voor het behoud van die waarde bij hergebruik van de data (of afgeleide informatie) is het van belang dat ook metadata worden meegenomen. Hierbij kan

het gaan om de onderzoeksvraag of informatiebehoefte op basis waarvan de meting is gedaan, om de gebruikte techniek en apparatuur, of om de data-verwerkingsstappen die zijn uitgevoerd, etc. De twee laatstgenoemde typen informatie zijn immers vaak ook indicatief voor de betrouwbaarheid van de data.

Een logische voorwaarde voor het (her)gebruik van data voor bovengenoemde toepassingen is vanzelfsprekend dat deze voldoen aan de zogenoemde FAIR-principes van *Findability*, *Accessibility*, *Interoperability* en *Reusability*.

Voor de ontwikkeling van systeemkennis en expertsystemen, voor het vergelijken van data en voor rapportage, is de beschikbaarheid van een centrale dataverzameling en -onderhoud essentieel. Veel verschillende gebruikersgroepen hebben daar behoefte aan en zien de waarde ervan. Een potentieel struikelblok bij het ontwikkelen en implementeren van een dergelijk systeem voor centrale data- en informatievoorziening, is dat investeringen in de benodigde infrastructuur voor databeschikbaarheid en informatievoorziening en bekostiging van onderhoud daarvan door marktpartijen en decentrale overheden, niet voor de hand liggend zijn. Zeer waarschijnlijk is hier sprake van zogenoemde 'tragedy of the commons'. De vraag of infrastructuur voor data- en informatievoorziening ten behoeve van waterkwaliteitsbeheersing als nutsvoorziening moet worden beschouwd, verdient daarom aandacht.

Samenvattend zijn de volgende voorbeelden van oplossings- en ontwikkelingsrichtingen geïdentificeerd:

- Open-source data-aggregatie
- Toekenning van vertrouwensniveaus aan meetdata
- Aandacht voor (de waarde van) metadata
- Onderzoeken of data-infrastructuur voor waterkwaliteitsbeheersing voldoet aan de criteria van nutsvoorziening en hier beleidsconsequenties aan verbinden

Programmamanagement

Ten behoeve van de efficiëntie en effectiviteit is er sterke behoefte aan programma-management dat de verantwoordelijkheid op zich neemt voor kennisuitwisseling, coördinatie, voortgangs-monitoring, monitoring van externe technologische ontwikkelingen, inventarisatie van stakeholderwensen en prioritering.

Zoals elders in deze routekaart beschreven is de waterwereld complex. Ze kent veel stakeholders in verschillende sectoren. Daardoor vindt ook veel innovatie in verschillende gremia plaats, die elkaar niet noodzakelijkerwijs tegenkomen of kennen. Ten behoeve van de efficiëntie is het belangrijk dat inspanningen niet dubbel worden gedaan. Dit vereist overzicht en coördinatie.

Een ander aspect is de interdisciplinariteit. De meet-informatie-actie-keten (Figuur 5) laat zien dat veel disciplines nodig zijn om succesvolle handelingsperspectief verschaffende sensingtechnologie te ontwikkelen. Het betreft hier zowel exacte als gedrags- en ontwerpwetenschappen. Het programmamanagement moet de vereiste interdisciplinariteit garanderen. Daarnaast is er ook een faciliterende en

monitorende rol op het gebied van de transdisciplinariteit die centraal door het programmamanagement kan worden ingevuld. Het betreft hier bijvoorbeeld het betrekken van gebruikersgroepen.

Ook is het voor het benutten van het potentieel voor cross-sectorale toepassing belangrijk dat oplossingen die in de ene sector worden gevonden, worden gedeeld met andere sectoren. Vanzelfsprekend wordt buiten een kennis- en innovatieprogramma voor handelingsperspectief verschaffende meettechnologie ook hard gewerkt aan onderzoek en ontwikkeling die daarvoor relevant kunnen zijn. Hierdoor is er behoefte om de benodigde poortwachtersactiviteiten voor nationale en internationale 'technologische en methodologische innovatie en kennisontwikkeling te coördineren en deels centraal te vervullen om programma-brede verspreiding mogelijk te maken. Het ontwikkelen van zogenoemde (thematische) kennistafels kan daarbij helpen. Zulke kennistafels kunnen ook een goed instrument zijn voor het delen van concrete resultaten van het programma. Gezien het grote aantal geïnteresseerde en benodigde bedrijven, (kennis) instellingen en andere stakeholders, ligt het voor de hand om community-vorming te faciliteren.

Omdat stakeholderwensen in de tijd kunnen veranderen, is ook op het gebied van stakeholdermanagement in de volle breedte een coördinerende rol weggelegd. Hetzelfde geldt voor de prioritering van ontwikkelingsactiviteiten. De ontwikkeling van meettechnologie voor specifieke waterkwaliteitsparameters moet worden afgestemd op de beschikbaarheid en ontwikkeling van interventies die die parameters beïnvloeden. Tenslotte zijn ook educatie en

internationale aansluiting typische onderwerpen die door een programmamanagement kunnen worden ingevuld (zie Hoofdstuk 7). Tabel 4 vat de innovatiebehoefte op het gebied van actiegericht meten samen in innovatielijnen. De omschrijvingen in deze tabel verwijzen deels naar de eerder in dit hoofdstuk genoemde paragrafen. Een ander deel is meer gedetailleerd en verwijst naar genoemde oplossings- en ontwikkelingsrichtingen. De naamgeving en fijnmazigheid van de innovatielijnen is slechts een eerste aanzet. Zij laten vooral zien dat coördinatie en communicatie tussen de innovatie-activiteiten belangrijke succesfactoren zijn voor de effectiviteit en efficiëntie van innovatie op het gebied van actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing.

Samenvattend zijn de volgende rollen voor programmamanagement geïdentificeerd:

- Genereren van overzicht en coördinatie
- Faciliteren van interdisciplinariteit
- Faciliteren van transdisciplinariteit
- Faciliteren van kruisbestuiving
- Internationale 'gatekeeping' en aanhaking
- Stakeholdermanagement
- Identificeren van educatiebehoefte

Tabel 4 : Innovatielijnen voor de ontwikkeling van 'actiegericht meten'

Omschrijving

Voorwaarden voor acceptatie en gebruik

- Waardengedreven systeemeisen
- Stakeholderinclusiviteit
- Fieldlabs, leaning communities, pilotfaciliteiten
- Regulatory sandboxes

Meettechnologie

- *In situ* sensing (puntmetingen)
- Remote sensing
- Doorontwikkeling bestaande concepten en functional models
- Nieuwe technologieën, zoals fotonische - en quantumsensing
- Nieuwe stoffen en stofklassen / parameters
- Miniaturisering en robuustheid
- Interfacing (omgevingscompatibiliteit)
- Juridische borging
- Mobiliteit en drone-compatibiliteit

Databeheer en -verwerking

- Harmonisering van data formats
- Data- en informatiebeheer en -toegankelijkheid
- Datamining en -correlatie (o.a. t.b.v. ontwikkeling van proxies)
- Dataveiligheid (*Secure by Design*)
- Ontwikkeling van expertsystemen

Transformatie naar actiegerichte informatie

- Leesbaarheid
- Vertaling naar handelingsperspectief
- Ontwikkeling expertsystemen
- Overzicht van beschikbare interventies

Programmamanagement en integraliteit

- Coördinatie van het programma (incl. bewaking van de integraliteit)
- Kennisuitwisseling
- Inventarisatie en validatie van opkomende behoeften
- Organiseren van afstemming tussen beleids- en innovatievraagstukken
- Poortwachtersrol voor nieuwe technologieën en methodologieën
- Prioritering op basis van beschikbare interventies
- Aansluiting internationaal
- Educatie

7 Kennis- en innovatielandschap

Hoewel de wetenschappelijke en innovatieve inspanningen vanwege de complexiteit en grootte van de watersector en het grote aantal sectoren dat water gebruikt, gefragmenteerd is, is de omvang ervan wel aanzienlijk. Dit vormt een stevige ondergrond voor de ontwikkeling en uitvoering van een innovatieprogramma voor 'actiegericht meten ten behoeve van waterkwaliteitsbeheersing'. Dit hoofdstuk geeft een, geenszins uitputtend, overzicht van relevante bestaande innovatieprogramma's en innovatiegemeenschappen.

Daarnaast beschrijft het de internationale context en het belang van aansluiting met educatie.

Omdat grote programma's en gemeenschappen ook kunnen ontstaan als reactie op (inter)nationale strategie(documenten) beschrijft het begin van dit hoofdstuk potentiële links met twee recente belangrijke strategiedocumenten: de Nationale Technologie Strategie [21] en het Rapport Wennink [4].

Aansluiting met recente belangrijke strategiedocumenten

In het kader van het nationale Missiegedreven Innovatiebeleid zijn Kennis- en Innovatieagenda's (KIA's) opgesteld voor grote maatschappelijke uitdagingen en ondersteunende sleuteltechnologieën en sleutelmethodeologieën (KET's en KEM's). 'Water' is een van de thema's in de KIA Landbouw, Water en Voedsel 2024-2027 en het onderwerp

waterkwaliteitsmeting is daar onderdeel van. Gezien het belang van water voor andere industrieën en volksgezondheid is met meerdere KIA's aansluiting mogelijk¹¹. Het onderwerp 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing' verbindt dus meerdere KIA's en is in sterke mate cross-sectoraal.

In de Nationale Technologie Strategie (NTS) is een tiental technologieën geprioriteerd. Sommige daarvan bevinden zich in de kern van deze routekaart doordat de technologie vooruitgang moet boeken om in de in deze routekaart gevraagde oplossingen te kunnen voorzien. Een uitdaging daarbij is evenwel de ontwikkeling van applicaties; een veel voorkomende barrière voor opschaling van het gebruik van technologieën. Andere zijn hulp-technologieën waarmee met de huidige stand van de techniek al voldoende wordt geleverd om in de gevraagde oplossingen te voorzien. Vanzelfsprekend wordt ook in die technologieën voortgang geapprecieerd en zullen relevante vernieuwingen worden geadopteerd.

Als het gaat om het succes van een technologie, benoemt de NTS expliciet het belang van toepassing in de maatschappij. De NTS geeft ook aan dat ontwerp voor en in samenwerking met specifieke doelgroepen daarvoor belangrijk is. Waterschappen worden als voorbeeld genoemd. In die zin komen de doelstellingen van de NTS overeen met die van deze routekaart.

- Fotonica wordt reeds veelvuldig gebruikt in sensingtechnologieën en het aantal potentiële toepassingen kan verdere groei tot gevolg hebben. Geavanceerde fotonica wordt momenteel slechts zeer beperkt ingezet voor het meten van waterkwaliteitsparameters. De **Actieagenda Optical Systems & Integrated Photonics** [22] zet onder andere in op de ontwikkeling van op optica en fotonica gebaseerde sensoren voor gebruik in de landbouw-, voedings- en gezondheidssectoren. Zo moeten sensoren kunnen worden ingezet voor emissie monitoring of het in kaart brengen van de biodiversiteit in de landbouwomgeving. Een van de uiteindelijke uitkomsten van de actieagenda is een portfolio van gevalideerde sensorplatforms en meetsystemen die in verschillende omgevingen kunnen worden ingezet. Het ligt in de lijn der verwachting dat applicaties die voor de bovengenoemde velden worden ontwikkeld, met enige aanpassing ook hun toepassing kunnen vinden in waterkwaliteitsanalyse.
- Op dit moment is nog niet met zekerheid te zeggen voor welke meetuitdagingen in het kader van waterkwaliteitsbeheersing kwantumsensoren een belangrijke rol gaan spelen, maar aansluiting met de ontwikkeling in de kwantumtechnologie zal wel steeds belangrijker worden, ook vanwege de interactie met optische systemen en geïntegreerde fotonica. Deze ontwikkelingen bieden mogelijk kansrijke routes naar miniaturisering en robuustheid van meettechnologie

¹¹ De KIA's worden in 2026-2027 geactualiseerd voor de periode 2028-2032. Zo komt er een 'eigen' KIA Water, Klimaatadaptatie & Maritiem, waarin ook nadrukkelijk cross-overs met andere sectoren worden opgenomen.

voor waterkwaliteitsparameters. Gezien de prioritering op toepassingsmarkten in de **Actieagenda Quantum Technologies** [23] wordt snelle ontwikkeling van die technologie voor waterkwaliteitsmeting niet verwacht. De inzet op ontwikkeling van technologie voor oppervlakte-functionaliseren om biomoleculen aan sensoren te koppelen zal misschien wel enige synergie hebben met de ontwikkeling van fotonische sensoren voor waterkwaliteitsmeting.

- In de NTS omvat de sleuteltechnologie 'proces-technologie' ook die van de procesintensificatie. Daarvoor is sensing en belangrijke enabler. De **Actieagenda Procestechnologie** [24] benoemt de essentiële rol voor water in procesintensivering. Tegelijkertijd wordt de procestechnologie in verband met de voorgestelde innovatieprogramma's Duurzame koolstofhub en Kritieke grondstoffen genoemd als een leverancier van oplossingen voor waterzuivering. In geval van de laatste wordt ook de behoefte aan bijpassende sensingtechnologie voor het meten van metaalconcentraties in (proces)waterstromen geïdentificeerd.
- Imagingtechnologie kan, zoals ook blijkt uit de kadertekst over remote sensing in Hoofdstuk 6, nuttige informatie voor waterkwaliteitsbeheersing genereren. De complementariteit met lokale metingen en remote sensing wordt ook in de NTS beschreven. De waarde van AI voor de verwerking van data die met imagingtechnieken zijn verkregen, wordt ook benoemd. Uit de **Actieagenda Imaging Technologies** [25] blijkt dat er synergie kan zijn tussen oplossingsrichtingen voor technische uitdagingen in de imaging technologie enerzijds en sensingtechnologie en

-dataverwerking anderzijds. Daarnaast worden diverse voor waterkwaliteitsbeheersing relevante potentiële toepassingen genoemd, zoals remote sensing voor biodiversiteitsmonitoring of imaging van microplastics en bacteriën in water.

- Mechatronica en Optomechatronica zijn belangrijke enablers voor sensing. In de NTS wordt de wens uitgesproken een publiek-privaat platform op te zetten dat de gehele breedte van de toepassingen van (opto)mechatronica verbindt. Sensortechnologie (voor waterkwaliteitsbeheersing) zou daar zeker aansluiting bij moeten vinden. De **Actieagenda Mechatronics & Optomechatronics** [26] benoemt betrouwbare datakalibratie in variabele, vervuilde en natte omgevingen als een van kennisvraagstukken die moet worden geadresseerd voor de integratie van sensoren en toepassing van (opto)mechatronica in voedselverwerking. Deze uitdaging doet zich – zoals eerder in deze routekaart aangegeven – ook voor bij de ontwikkeling van sensoren voor waterkwaliteitsmeting. Daarnaast benoemt de actieagenda bij het programma voor onbemenste systemen de kennisvraag welke geavanceerde technieken kunnen worden gebruikt voor de ontwikkeling van onderwater-platformen met statische basisdrones en dynamische sub-drones.
- Analyse van de grote datasets die met behulp van sensing worden gegenereerd, leent zich goed voor de inzet van Artificial Intelligence. Te denken valt aan het zoeken naar correlaties in tijd (monitoring) of ruimte (tussen waterlichamen), maar ook tussen stoffen onderling en bijvoorbeeld chemische waterkwaliteitsparameters enerzijds en ecologische anderzijds. Hoewel niet expliciet genoemd in de NTS, kan dit een nichetoepassing zijn die een

showcase vormt voor de (nieuwe) Nederlandse capaciteiten op het gebied van AI. De ontwikkeling van een functionele dataspace waarin de data worden beheerd, past daar goed bij. Hoge kwaliteit van data, die in het kader van deze routekaart een noodzakelijk is, wordt in de NTS benadrukt als een kans om de Nederlandse AI te versterken. De **Actieagenda AI & Data** [27] identificeert sensor-technologie als een cross-over met Optical systems and integrated photonics, Quantum technologies en Mechatronics and optomechatronics. De agenda geeft aan dat neuromorphic computing de dataverwerking op sensoren kan versnellen.

- Semiconductortechnologie is vanzelfsprekend een belangrijke enabler voor sensingtechnologie, vanwege de vereiste rekenkracht voor dataverwerking. Mogelijkerwijs kunnen elementen van de semicon fabricagetechnologie ook worden gebruikt in de ontwikkeling van sensormaterialen met specifieke gevoeligheden voor bepaalde stoffen/stofklassen.

Het Rapport Wennink [4] is de vertaling van het Europese Draghi-rapport naar de Nederlandse context en beschrijft wat nodig is om economische groei in de toekomst te verzekeren en de maatschappelijke uitdagingen op het gebied van gezondheid, ouderenzorg, defensie en de energietransitie het hoofd te bieden. Het rapport stelt dat met investeringen van € 151-187 miljard, die grotendeels uit de private sector moeten komen, en gebruikmakend van de sterke kennisbasis, innovativiteit van bedrijven en de publiek-private samenwerkingstraditie, Nederland mondiaal een technologisch relevante speler kan zijn en de eigen strategische relevantie in hoogtechnologische waardeketens kan waarborgen.

De bovengenoemde technologieën komen ook voor in het overzicht van de projectvoorstellen van Rapport Wennink [28]. In het bijzonder de projectvoorstellen 'Fotonische Chips', 'Neuromorphic Computing', 'DeltaAI', 'Foundational Robotics Lab' en 'ChipNL', zijn daar voorbeelden van. In welke mate deze programma's kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van 'actiegericht meten' zal sterk afhangen van de uitwerking ervan.

Ook met andere programma's uit de bijlage van het Rapport Wennink is er potentiële interactie, zij het dat deze vanwege de noodzaak tot gebruik van water voor proces of lozing, deels afhankelijk zijn van de kwaliteit van water. Het betreft hier veel van de voorstellen in het cluster 'Energie- en Klimaattechnologie', plus het voorstel 'Food 2040' en – omdat deze naast veel energie naar verwachting ook veel water zullen gebruiken – de voorstellen 'AI Gigafabriek' en 'Dutch Data & Energie Clusters'. Een speciale vermelding is op zijn plaats voor het project PFAS Verwijdering omdat dit project zowel tijdens de ontwikkeling als na implementatie van vernieuwende PFAS-verwijderingstechnologie, baat heeft bij betrouwbare en betaalbare meettechnologie voor de bepaling van PFAS-concentraties in water, plus de bijbehorende informatievoorziening.

Het Nationaal Programma Circulaire Economie [29] schetst in het wenkend perspectief van 'Nederland circulair in 2050' onder andere dat de biodiversiteit zich heeft hersteld en ook de lucht-, bodem- en

waterkwaliteit weer op peil zijn. De circulaire economie moet daaraan bijdragen. Zo moet zwerfafval worden voorkomen en moeten ZZS worden uitgefaseerd. Door minder primaire grondstoffen te gebruiken, worden schadelijke milieueffecten bij de winning en verwerking ervan voorkomen. De emissie van microplastics naar het milieu moet worden voorkomen door het sluiten van de plasticketen en productinnovatie. Door de stimulering van kringlooplandbouw moet de efficiëntie van nutriënten worden verhoogd en de emissie naar water, en bodem en lucht, worden verminderd. De actualisatie van het programma [30] erkent verder het essentiële belang van schoon water als ecosysteemdienst. Met verwijzing naar de actualisatie van het Nationaal Water Programma benoemt het document circulaire water-technologie en hergebruik van gezuiverd stedelijk afvalwater als instrumenten om de milieudruk op het watersysteem te verminderen.

Bestaand actief nationaal innovatielandschap en bestaande programma's

- KRW-impulsprogramma: In het KRW-impulsprogramma, voortbouwend op de Kennisimpuls Waterkwaliteit¹², werken rijksoverheid, provincies, waterschappen en andere stakeholders samen om in 2027 te kunnen voldoen aan de KRW. Daarom zijn de partners in het KRW -impulsprogramma belangrijke stakeholders in 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing'. Dit geldt

in het bijzonder voor de actielijnen 'Intensiveren van maatregelen voor stoffen', 'Verankering van afspraken en regelgeving' en 'Bepalen toestand, prognose en resterend handelingsperspectief' van het impulsprogramma.

- UPPWATER: Het Nationaal Groeifondsprogramma UPPWATER¹³ brengt ongeveer 600 partners (bedrijven, onderzoeksinstellingen, waterschappen, overheden, etc.) bij elkaar en zet in op de groei, ontwikkeling en export van de water-technologiesector. Met name het focusgebied Digitalisering is relevant voor actiegericht meten, bijvoorbeeld met het project voor datagestuurde zuiveren van rioolwater. Veel van de projecten in UPPWATER zetten in op waterzuivering en/of de winning van grondstoffen uit afvalwater en zijn zodoende ook relevant voor de prioritering van ontwikkeling van specifieke meettechnologieën.
- PhotonDelta: Het Nationaal Groeifondsprogramma PhotonDelta¹⁴ zet in op de industriële productie van impactvolle toepassingen van geïntegreerde fotonica. Daarbij gaat het om de integratie van fotonische functies in microchips. Het richt zich op verschillende toepassingsgebieden, waaronder Voedsel en landbouw en Medische en gezondheidszorg. Naar verwachting zijn innovaties die ten behoeve van deze applicatiegebieden worden ontwikkeld, deels te vertalen naar oplossingen voor 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing'.

¹² www.stowa.nl/kennisimpuls-waterkwaliteit

¹³ www.nationaalgroeifonds.nl/overzicht-lopende-projecten/thema-landbouw-voedsel-en-land-en-watergebruik/groeiplan-watertechnologie

¹⁴ www.photondelta.com/

- Digilab: Digilab¹⁵ faciliteert ontwikkeling en testen van gegevensuitwisseling in een Federatief Datastelsel. Expertise en oplossingen op verschillende gebieden, waaronder standaardisatie, automatisatie, authenticatie en technische interoperabiliteit van data, kunnen door deelnemers worden ingezet voor de ontwikkeling van applicaties. Momenteel nemen ongeveer 20 overheidspartijen deel in Digilab.
- Digishape: Digishape¹⁶ is een open-innovatieplatform waarin bedrijven, kennisinstellingen en overheden het potentieel van digitalisering van de watersector verkennen. Het platform faciliteert vooral projecten op het gebied van waterkwantiteit en logistiek.
- Nationale Wetenschapsagenda (NWA)¹⁷: De route Meten & Detecteren van de Nationale Wetenschapsagenda zet met zijn tweede gamechanger in op meten waar en wanneer dat nodig is, dus on-site en in situ. De vierde gamechanger van de route 'Leren omgaan met meetgegevens' adresseert de leesbaarheid en het gebruik van gemeten data en de juridische, ethische en sociale aspecten daarvan. Deze laatste gamechanger is daarmee relevant voor de vertaling van data naar handelingsperspectief.
- De Blauwe Route van de NWA richt zich op water-deltavraagstukken, waterkwaliteit en transport over water in het bijzonder. De tweede gamechanger van de route betreft duurzaam en economische gebruik van water.
- Momentum: Momentum¹⁸ is een publiek-privaat samenwerkingsverband van meer dan 30 bedrijven en kennisinstellingen dat onderzoek doet naar de gezondheidseffecten van micro- en nanoplastics en naar potentiële oplossingen om de gezondheidsimpact te minimaliseren.
- Fieldlab Liefstingsbroek: Het fieldlab Liefstingsbroek¹⁹ is een onderzoeksinitiatief dat zich richt op het ontwikkelen en testen van effectieve methoden voor het meten en terugdringen van stikstofemissies. Liefstingsbroek is een Gronings Natura 2000-reservaat met stikstofgevoelige natuur.
- TI-COAST: COAST is de publiek-private innovatiegemeenschap voor analytische wetenschap en technologie. De organisatie kent verschillende Communities of Practice, waaronder één op het gebied van wateranalyse. Daarin wordt aandacht gegeven aan innovatie en educatie.
- ILOW: ILOW²⁰ is het overlegorgaan van de 25 waterschappen en Rijkswaterstaat. Zij hebben 6 labs voor analyse van water, grond en slib. Belangrijke actielijnen zijn kwaliteitsborging, methodeontwikkeling en normontwikkeling.
- Watercampus Leeuwarden: De Watercampus Leeuwarden²¹ verbindt meer dan 300 bedrijven en kennisinstellingen om synergie te bewerkstelligen op het gebied van innovatie, onderwijs en ondernemerschap in de watertechnologie. Het heeft de ambitie om deze rol voor geheel Europa te vervullen. Onder andere kennisinstituut Wetsus, dat deel uitmaakt van de Watercampus, geeft uitvoering aan een onderzoeksthema 'sensing'.
- Informatiehuis Water: Het Informatiehuis Water²² is een samenwerking van RWS, waterschappen en provincies en faciliteert de uitwisseling van betrouwbare data over onder andere de Nederlandse waterkwaliteit.
- Het Waterschapshuis: Het Waterschapshuis²³ is een initiatief van de 21 Nederlandse waterschappen waarin zij samenwerken aan het 'data-gedreven waterschap van de toekomst'. Het kent verschillende actielijnen op het gebied van waterkwaliteitsdata, waaronder standaardiseren van data, cyberveiligheid en prognostiek.
- LMO: LMO is het samenwerkingsverband van laboratoria in de drinkwatersector.

¹⁵ digilab.overheid.nl/

¹⁶ www.digishape.nl/

¹⁷ Opgemerkt moet worden dat programmalijn 2 van het subsidie-instrumentarium van NWA, ministeries en andere overheden de mogelijkheid biedt om een thematische call te ontwikkelen voor complexe maatschappelijke uitdagingen waarvoor nog geen of onvoldoende oplossingen of handelingsperspectieven zijn.

¹⁸ momentummicroplastics.nl/

¹⁹ www.hetliefstingsbroek.nl/maatwerk-met-meetwerk

²⁰ ilow.nl/

²¹ www.watercampus.nl/

²² www.ihw.nl

²³ www.hetwaterschapshuis.nl

- OnePlanet: OnePlanet²⁴ combineert de domein-expertise van WUR, RU en Radboudumc met de kennis van imec, onder andere op het vlak van sensortechnologie, datascience/ kunstmatige intelligentie voor oplossingen voor grote maatschappelijke uitdagingen, zoals de stikstofproblematiek.
- KWR Water Research Institute: KWR is een onderzoeksinstituut dat zich richt op waterkwaliteit, waterbehandeling en een duurzame watercyclus. Het instituut beschikt over eigen laboratoria en ontwikkelt kennis door middel van toegepast wetenschappelijk onderzoek. Belangrijke onderzoekslijnen zijn Chemische en Microbiologische waterkwaliteit, waaronder ook methodenontwikkeling en innovatieve meettechnieken vallen.
- Deltares: Deltares is een kennisinstituut voor toegepast wetenschappelijk onderzoek op het gebied van water, ondergrond en infrastructuur. Deltares ontwikkelt standaard en op maat gemaakte meetinstrumenten en geavanceerde meettechnieken en geavanceerde datafaciliteiten.

Internationaal

In de EU-strategie voor aanpassing aan de klimaatverandering noemt de Europese Commissie de wens om inzicht te verkrijgen in de wisselwerking tussen klimaatverandering, ecosystemen en de diensten die ze verstrekken. Inzicht in de dynamiek van de waterkwaliteit maakt daar deel van uit. Ook de gevolgen van klimaatverandering voor het watermanagement (waaronder riolen) in de stedelijke omgeving krijgen aandacht. Daarnaast

wordt erkend dat veranderingen in de landbouw-praktijk en het streven naar efficiënter watergebruik in de industrie, gevolgen kunnen hebben voor de waterkwaliteit. De Europese Commissie gaat helpen om het duurzaam gebruik en beheer van water over sectoren en grenzen heen te waarborgen, onder andere door het verbeteren van de toewijzing van watervergunningen.

Met de Europese waterweerbaarheidsstrategie (Water Resilience Strategy, WRS) [31] heeft de EU onder andere de ambitie om waterverontreiniging te voorkomen en aan te pakken. Een van de hoofdpunten van deze strategie is een publiek-privaat initiatief voor de doorbraak van haalbare en betaalbare methoden voor detectie (en sanering) van PFAS en andere persistente chemische stoffen. Een ander hoofdpunt is ondersteuning van de lidstaten bij de terugdringing van verontreiniging door nutriënten, onder andere door betere modellen, interactieve kaarten en het delen van best practices. Hier liggen evidente kansen voor de verwezenlijking van de ambities van deze routekaart. Een speerpunt van de WRS is ook digitalisering, met als onderdeel het standaardiseren en toegankelijk maken van grote (vooralsnog decentraal opgeslagen) data (richtlijn open data). De EU wil agrariërs stimuleren om milieu- (en klimaat)prestaties van hun bedrijven te verbeteren, onder meer in de richting van beter waterbeheer. Voor de industrie zet de EU in op proefprojecten voor waterloze en gesloten waterkringlopen. Hierbij is vanzelfsprekend een rol weggelegd voor handelingsperspectief verschaffende waterkwaliteitsmeting.

Ten behoeve van het veiligstellen van schoon en betaalbaar water voor iedereen wil de EU onder andere inzetten op bewustmaking van het publiek en het beginsel 'de vervuiler betaalt' stimuleren. Dit vereist frequente, goed toegankelijke én juridisch borgbare informatie over waterkwaliteit. Aandacht voor digitale vaardigheden in de watersector biedt mogelijkheid voor aansluiting op de Human Capital Agenda (HCA).

In het kader van het Europees instituut voor Innovatie en Technologie (EIT) zet de EU in op een Kennis- en innovatiegemeenschap (KIC) op het gebied van water-, mariene en maritieme sectoren en ecosystemen. Het Horizon Europe subsidieprogramma Water4All is een voorbeeld van een reeds bestaand initiatief (gestart in 2022, met een looptijd van 7 jaar), dat zich richt op grootschalige waterbeschikbaarheid voor de lange termijn.

Opleiding en training

Goed opgeleid personeel is een cruciale succesfactor voor innovatie. Om die reden moeten capaciteit en kennisniveau van personeel dat de innovaties gaat ontwikkelen en gebruiken, worden gegarandeerd. In deze behoefte zal deels worden voorzien doordat medewerkers en studenten die deelnemen aan ontwikkelactiviteiten in fieldlabs en proeftuinen, 'spelenderwijs' ervaring en kennis opdoen. Daarnaast zal echter ook opschaling nodig zijn. Bijscholing van bestaande medewerkers (Leven Lang Leren) en opleiding van studenten (academisch, hbo en mbo) is daarvoor noodzakelijk, in het

²⁴ www.oneplanetresearch.nl/

bijzonder om nieuwe technieken te leren kennen, de voordelen en valkuilen van eventueel in te zetten AI te leren kennen, toegankelijke en juridisch geborgde meet- en informatiesystemen te ontwikkelen en gebruiken, en bekend te worden met methodieken voor de vertaling van meting naar actie. De (voormalige) Topsector Water & Maritiem (TSWM) zet in samenwerking met het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) reeds in op vernieuwing van opleidingen. Dat gebeurt door het onderwijs zo dicht mogelijk bij de praktijk te organiseren en liefst langjarig te koppelen aan innovatieprojecten. In dit kader kan een publiek-private Learning Community op het gebied van 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing' uitkomst bieden, in het bijzonder voor aspecten die nog niet in bestaande learning communities, zoals Digishape, aan de orde komen. Vanwege het crossover-karakter van het thema 'sensing' voor waterkwaliteitsbeheersing, kan een dergelijke community ook in samenwerking met andere sectoren worden georganiseerd. Een positief bijkomend effect van transparantie van metingen in gemakkelijk toegankelijke databases is, dat daardoor ook de bewustwording bij burgers wordt gestimuleerd, hetgeen doorgaans instroom-bevorderend werkt. Concluderend is een goede wisselwerking mogelijk én nodig tussen deze routekaart en de HCA van de TSWM en I&W, in het bijzonder op missies 1 (Uitdagen, moderniseren en innoveren van kennis en kunde) en 3 (Bemensing, de mensen op de juiste positie, doorgroei en matchmaking) van de HCA.



Foto: Karen Visser

Vervolg op deze routekaart

Vanwege de urgentie van handelingsperspectief voor het verbeteren van de oppervlakte- en grondwaterkwaliteit en het voldoen aan de wet- en regelgeving is regie op de in deze routekaart beschreven thematiek cruciaal. Zonder eigenaarschap van de thematiek krijgen focus op het doel 'optimalisatie van waterkwaliteitsbeheersing' en afstemming van innovatie-activiteiten geen kans. Met de dreiging van economische en maatschappelijke verlamming als gevolg van de KRW 2027 is dat allesbehalve wenselijk.

Regie en inhoudelijke definitie van een innovatieprogramma moeten de noodzakelijke impuls leveren om effectieve waterkwaliteitsbeheersing mogelijk te maken. Er zijn substantiële langjarige investeringen nodig met een omvang en duur die vergelijkbaar zijn met die van een groeifondsprogramma.

Opvolging op de routekaart moet voorzien in oplossingen die op de korte termijn implementeerbaar zijn. Daarnaast moet een innovatieprogramma een begin maken met het ontwikkelen van een

ecosysteem voor toekomstige (langetermijn)innovaties op het gebied van 'actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing'.

Zoals in dit document aangegeven, zijn er delen van de meet-informatie-actie-keten die extra aandacht behoeven: ontwikkeling van meettechnologie, realiseren van faciliteit(en) voor FAIR databeheer en informatievoorziening, vertaling van meetgegevens naar handelingsperspectief. Ten aanzien van het eerste, de ontwikkeling van meettechnologie, kunnen twee activiteiten richting geven. Ten behoeve van de prioritering is dat een inventarisatie van interventies die emissies kunnen mitigeren van contaminanten nu nog niet goed (genoeg) gemeten kunnen worden (lees: een behoeftescan). Voor de snelheid van het behalen van successen is dat een inventarisatie van beschikbare meettechnologieën die met enige aanpassing - 'translatiepotentieel'- ingezet kunnen worden voor waterkwaliteitsmonitoring (lees: een technologiescan).

De in dit document gestelde vraag of data-infrastructuur een nutsvoorziening is, speelt een belangrijke rol bij het realiseren van faciliteiten van databeheer en informatievoorziening. Tegelijkertijd kunnen bestaande (nationale en Europese) initiatieven voor databeheer en -beschikbaarheid verlengd, versterkt en uitgebreid worden.

Een geïntensiveerde voortzetting van de bij de totstandkoming van deze routekaart geïnitieerde dialoog met de verschillende gebruikersgroepen kan het begin vormen van de interdisciplinaire aanpak van 'vertaling naar handelingsperspectief'. Daarbij spelen sleutelmethodeën (KEM's) vanzelfsprekend een belangrijke rol.

Zoals in dit document benadrukt, is programma-management (ook in de opstartfase) essentieel voor succes. De doelstellingen van waterkwaliteitsbeheersing zijn duidelijk. Nu is het zaak om alle zeilen bij te zetten om die doelen te bereiken. Niet de wind maar de stuurder bepalen de koers!

Verantwoording

Deze routekaart is ontwikkeld in opdracht van het bestuur van TKI Watertechnologie om met dit cross-sectorale thema nadere invulling te geven aan de kennis- en innovatieagenda (KIA) “Water, Klimaatadaptatie en Maritiem”. Voor de ontwikkeling is door TKI Watertechnologie samengewerkt met 2PiR – Measurement and Circularity Consulting en gebruik gemaakt van het voorwerk van SensingNL²⁵.

Voor de totstandkoming van deze routekaart zijn diverse vertegenwoordigers van stakeholdergroepen bevraagd in workshops en interviews. Zonder volledig te kunnen zijn, gaat onze dank uit naar de volgende personen en organisaties:

Allard van Leerdam (Staatsbosbeheer), Arthur van den Berg (Glastuinbouw Nederland), Barry

Doesburg (FrieslandCampina), Claudia Hofstra (Staatsbosbeheer), Corné Lugtenburg (WUR), Eric van Sprang (TI-COAST), Gerard Stroomberg (RIWA Rijn), Gertjan Medema (KWR / TU Delft), Jaco van Heemskerk (Natuurmonumenten), Jeroen Gevers (FME), Jim van Ruijven (WUR), José Vogelesang (TKI Tuinbouw & Uitgangsmaterialen), Jules van Lier (TU Delft), Lianne van Oord (Circle Infra Partners), Lotte Stoppelenburg (VNCI), Peter van der Maas (Hogeschool van Hall Larenstein), Remco Suer (OnePlanet Research Center), Stefan Kools (KWR), Wiebe Vos (Universiteit Twente).

Ook de mensen die hier niet zijn genoemd, verdienen onze waardering voor hun bijdrage.

²⁵ SensingNL is in het leven geroepen door onder andere ChemistryNL, TI-COAST en OnePlanet als platform voor de ontwikkeling en implementatie van geavanceerde sensingtechnologie. Het platform zette aanvankelijk in op de ontwikkeling van een groeifondsvoorstel op het gebied van stikstof en water, maar dit is vanwege het afschaffen van het Nationaal Groeifonds (NGF) gepauzeerd.

Lijst van afkortingen en begrippen

AI	Artificial Intelligence (NL: Kunstmatige intelligentie)	OSDA	Open-Source Data-Aggregatie
CZV	Chemisch Zuurstofverbruik (een maat voor de hoeveelheid oxideerbaar materiaal die in water aanwezig is)	PAK's	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
Edge computing	decentrale technologie die berekeningen dicht bij de bron brengt	Passive sampling	methode voor milieumonitoring die verontreinigingen in de tijd (accumulatief) verzamelt
DaaS	Data as a Service	PCB's	Polychloorbifenylen
DCS	Distributed Control System	(q)PCR	(quantitative) Polymerase Chain Reaction (voor DNA-bepaling)
HCA	Human Capital Agenda	PFAS	Per- en polyfluoralkylstoffen
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable	pH	Zuurgraad
Fotonica	genereren, transporteren, manipuleren en detecteren van fotonen, bijvoorbeeld voor het meten aan materie	PMG	Provinciaal Meetnet Grondwaterkwaliteit
GIS	Geografisch InformatieSysteem	Proxy(meting)	(het meten van) een parameter die representatief of indicatief is voor een andere, doorgaans minder makkelijk te bepalen parameter
I&W	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat	Regulatory sandbox	Een gecontroleerde omgeving waarin aan innovaties verbonden kansen en risico's bestudeerd worden voor de ontwikkeling van regelgeving
ILT	Inspectie Leefomgeving en Transport	RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
IoT	Internet of Things	RWS	Rijkswaterstaat
KEM	Key enabling methodology (sleutelmethode)	TOC	Total Organic Carbon (gehalte aan organische verbindingen)
KRW	Kaderrichtlijn Water (EN: Water Framework Directive, WFD)	TSWM	Topsector Water en Maritiem
LMG	Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit	WDME	Water Data Management Ecosystem
MALDI-TOF	Matrix-Assisted Laser Desorption and Ionization – Time of Flight (massaspectrometrie)	WRS	Water Resilience Strategy (van de EU)
MIPs	Molecularly Imprinted Polymers	ZZS	Zeer Zorgwekkende Stof(fen)
ML	Machine Learning		
NSAID	Non-steroïde anti-inflammatoire drug (ontstekingsremmende pijnstiller)		
NTS	Nationale TechnologieStrategie		
NWA	Nationale WetenschapsAgenda		

Referenties

- [1] REPORT FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Floods Directive (2007/60/EC), Brussels, 4 February 2025.
- [2] Landelijk Dashboard KRW-maatregelen 2024, versie 2.0, 19 juni 2024, open.overheid.nl/documenten/dpc-d702db4a91928eeca3f6da6ac936ff5265b66c46/pdf
- [3] Chemische Waterkwaliteit KRW 2024, (indicator 1566, versie 06, 15 december 2025), www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen., www.clo.nl/indicatoren/nl156606-chemische-waterkwaliteit-oppervlaktewater-krw-2024
- [4] RAPPORT WENNINK, DE ROUTE NAAR TOEKOMSTIGE WELVAART Een sterk Nederland in een relevant Europa, Veldhoven, december 2025, www.rapportwennink.nl
- [5] RICHTLIJN (EU) 2024/3019 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 27 november 2024 inzake de behandeling van stedelijk afvalwater, data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj
- [6] Stoffenlijst KRW Impuls 2023, Informatiepunt voor de Leefomgeving, iplo.nl/thema/water/oppervlaktewater/kaderrichtlijn-water/opgaven-krw/chemische-stoffen/stoffenlijst-krw-impuls/
- [7] RICHTLIJN 2006/7/EG VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 15 februari 2006 betreffende het beheer van de zwemwaterkwaliteit en tot intrekking van Richtlijn 76/160/EEG, gewijzigd bij Verordening (EG) nr. 596/2009 van het Europees Parlement en de Raad van 18 juni 2009 en Richtlijn 2013/64/EU van de Raad van 17 december 2013, data.europa.eu/eli/dir/2006/7/2014-01-01
- [8] RICHTLIJN 2006/118/EG VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 12 december 2006 betreffende de bescherming van het grondwater tegen verontreiniging en achteruitgang van de toestand, gewijzigd bij Richtlijn 2014/80/EU van de Commissie van 20 juni 2014, eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj
- [9] Bijlage A behorend bij Hoofdstuk 3 van het Drinkwaterbesluit, wetten.overheid.nl/BWBR0030111/2024-01-01#BijlageA
- [10] Medicijnresten uit water, S. ter Hark en A. Lambooi, Instituut Verantwoord Medicijngebruik, juni 2025, www.medicijngebruik.nl/projecten/rapport/5756/rapport-medicijnresten-uit-water
- [11] CBS, 2023, Waterwinning en watergebruik in Nederland, 1976-2021. CBS Den Haag, www.clo.nl/nl005717
- [12] Graveland, C., Baas, K., Opperdoes, E., 2017. Physical water flow accounts with Supply and Use and water asset/water balance assessment NL, CBS, Den Haag
- [13] CBS Statline, 2019a. Watergebruik bedrijven en particuliere huishoudens; nationale rekeningen. Centraal Bureau voor de Statistiek, opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82883NED/table?ts=1555497401962
- [14] CBS Statline, 2019b. Zuivering van stedelijk afvalwater. CBS, Den Haag, opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/7477/table?ts=1555321763052
- [15] J. de Weert, F. Smedes "Overzicht Toepassingsmogelijkheden van Passive Sampling", STOWA 2014.042. ISBN 978.90.5773.643.8
- [16] P. Timmers, E. Amato, G. Eisinga "Passive Sampling van micro-organismen en virussen", KWR, BTO2023.062.

- [17] P.M.S. Tchekwagep, R.D. Crapnell , C.E. Banks, K. Betlem, U. Rinner, F. Canfarotta, J.W. Lowdon, K. Eersels , B. van Grinsven , M. Peeters, J. McClements “Critical Review on the Use of Molecular Imprinting for Trace Heavy Metal and Micropollutant Detection”, Chemosensors, 2022, 10, 296.
doi.org/10.3390/chemosensors10080296
- [18] Handreiking Gebiedsgerichte terugkoppeling gewasbeschermingsmiddelen en water Opgesteld door CLM Onderzoek en Advies – versie sept. 2024
www.clm.nl/wp-content/uploads/2024/12/Handreiking-Gebiedsgerichte-Terugkoppeling.pdf
- [19] Inbreng VNCI Commissiedebat Water op 24 september 2025, Den Haag, 11 september 2025.
- [20] Op weg naar toekomstbestendige watervergunningen: knelpunten en oplossingsrichtingen, VNCI en vemw, november 2025,
www.vemw.nl/kennisbank-detail/2025/11/24/paper-op-weg-naar-toekomstbestendige-watervergunningen-knelpunten-en-oplossingsrichtingen
- [21] De Nationale Technologiestrategie - Bouwstenen voor strategisch technologiebeleid, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, januari 2024,
open.overheid.nl/documenten/21220633-4dcf-4334-8f7c-c390eda7d29a/file
- [22] KIA ST Actieagenda Optical Systems en Integrated Photonics 2025, Versie 1.0, 16-12-2025,
www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-optical-systems-integrated-photonics
- [23] KIA ST Actieagenda Quantum Technologies 2026, Versie 1.0, 26-01-2026,
www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-quantum-technologies
- [24] KIA ST Actieagenda Quantum Technologies 2026, Versie 1.0, 26-01-2026,
www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-quantum-technologies
- [25] Van beeld tot actie: cross-sectorale aanpak, KIA ST Actieagenda Imaging Technologies 2026, Versie 1.0, 26-01-2026,
www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-imaging-technologies
- [26] KIA ST Actieagenda Mechatronica en Optomechatronica 2025, Versie 1.0, 26-01-2026,
www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-mechatronics-optomechatronics
- [27] Digital Holland, KIA Digitalisering Actieagenda AI &Data, www.kia-st.nl/kia-sleuteltechnologieen/actieagendas-nts/actieagenda-ai-data
- [28] DE ROUTE NAAR TOEKOMSTIGE WELVAART – PROJECTVOORSTELLEN, bijlage bij Rapport Wennink, Veldhoven, december 2025.
- [29] Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, februari 2023,
<https://open.overheid.nl/documenten/ronl-1f7c0a2ad0bbe71deb8dc4e32b30d6d19d9e28/pdf>
- [30] Nationaal Programma Circulaire Economie 2025, actualisatie van het NPCE, Rijksoverheid, oktober 2025,
<https://open.overheid.nl/documenten/0b441980-8d06-4153-b59d-60715a28160c/file>
- [31] MEDEDELING VAN DE COMMISSIE AAN HET EUROPEES PARLEMENT, DE RAAD, HET EUROPEES ECONOMISCH EN SOCIAAL COMITÉ EN HET COMITÉ VAN DE REGIO'S - Europese strategie voor waterweerbaarheid, COM(2025) 280 final, Brussels, 4 June 2025.

Colofon

April 2026

Deze routekaart Actiegericht meten voor waterkwaliteitsbeheersing is opgesteld in opdracht van TKI Watertechnologie

Deze publicatie is openbaar.

Auteurs

Joep van den Broeke (KWR Water Research Institute)

Oscar van den Brink (2PiR – Measurement and Circularity Consulting)

Vormgeving

Karen Visser Ontwerp

Stichting TKI Watertechnologie

Groningenhaven 7

3430 BB Nieuwegein

info@tkiwatertechnologie.nl

www.tkiwatertechnologie.nl

