

‘Smart Nutrient Retention Networks’

Kansen voor verduurzaming van waterkwaliteits- en nutriëntenbeheer

Nutriënten zoals stikstof en fosfor spelen een cruciale rol in aquatische ecosystemen, maar een overschot leidt tot problemen zoals algenbloei en verlies van biodiversiteit. Traditionele maatregelen in waterbeheer richten zich vaak op individuele waterlichamen, terwijl nutriënten zich juist verspreiden via complexe netwerken van meren, rivieren en kanalen. Het concept van Smart Nutrient Retention Networks (SNRN's) biedt een geïntegreerde benadering waarin de retentie en herverdeling van nutriënten binnen een stroomgebied worden meegenomen.

Al in 1862 schreef Victor Hugo in *Les Misérables* dat schepen tegen hoge kosten worden uitgezonden om de mest van stormvogels en pinguïns op de Zuidpool te verzamelen, terwijl we tegelijkertijd onze eigen rijkdom aan voedingsstoffen gedachteloos naar zee laten stromen. Zijn woorden blijven anderhalve eeuw later verrassend actueel: nog steeds proberen we ons zo snel mogelijk te ontdoen van nutriëntenrijk afval, terwijl deze reststoffen juist waardevolle grondstoffen bevatten voor voedselproductie. Ondanks vooruitgang in rioolwaterzuivering en efficiënter gebruik van meststoffen op land, belandt een deel van deze nutriënten voorsnog onvermijdelijk in oppervlaktewateren, waar ze bijdragen aan eutrofiëring - overmatige verrijking met voedingsstoffen (Boesch, 2002). Een deel wordt vastgelegd in het watersysteem, bijvoorbeeld in de bodem, maar veel nutriënten raken onbereikbaar voor hergebruik doordat ze uiteindelijk naar zee uitspoelen (De Jonge et al., 2002; Cordell et al., 2009). Dit leidt tot een incomplete nutriëntenkringloop op menselijke tijdschalen. Tegelijkertijd vormen nutriëntenoverschotten in oppervlaktewateren een bedreiging voor mens en natuur, met gevolgen zoals giftige algenbloei en zuurstoftekorten (Chislock et al., 2013). Ook beïnvloedt eutrofiëring belangrijke ecosystemendiensten,

zoals de drinkwater- en voedselvoorziening en recreatieve functies van heldere, met waterplanten begroeide wateren (Rodrigues, 2015; Hilt et al., 2017; Janssen et al., 2020).

Om het dubbele probleem van nutriëntenverlies – zowel als oorzaak van eutrofiëring als verspilling van waardevolle grondstoffen – op grotere schaal aan te pakken, is het *Smart Nutrient Retention Network* (SNRN)-concept ontwikkeld (Van Wijk et al., 2021). Dit concept biedt een vernieuwende benadering voor waterkwaliteitsbeheer door te focussen op het vasthouden en terugwinnen van voedingsstoffen in onderling verbonden aquatische ecosystemen. Daarbij speelt het versterken van ruimtelijke feedbackmechanismen een sleutelrol.

Met de focus op verbonden watersystemen sluit het SNRN-concept aan bij de principes van integraal en grootschalig waterbeheer, zoals vastgelegd in de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW), de aanbevelingen van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw (WB21) (Tielrooij et al., 2000) en de beleidsvisie *Bodem en Water Sturend* (Harbers & Heijen, 2022). Het SNRN-concept en deze principes beogen allemaal de afwenteling van water(kwaliteits)problemen naar andere gebieden of sectoren te voorkomen. Daarnaast biedt het SNRN kansen om teruggewonnen nutriënten opnieuw

ecologische terugkoppeling
hydrologische netwerken
modellen
nutriëntenretentie
waterkwaliteit

D. (Dianneke) van Wijk
Nederlands Instituut voor
Ecologie (NIOO-KNAW),
Afdeling Aquatische Ecologie
Postbus 50, 6700 AB
Wageningen;
d.vanwijk@nioo.knaw.nl

L. (Lilith) Kramer
Nederlands Instituut voor
Ecologie (NIOO-KNAW),
Afdeling Aquatische Ecologie /
Wageningen University &
Research, Aquatische Ecologie
en Waterkwaliteitsbeheer

W. M. (Wolf) Mooij
Nederlands Instituut voor
Ecologie (NIOO-KNAW),
Afdeling Aquatische Ecologie /
Wageningen University &
Research, Aquatische Ecologie
en Waterkwaliteitsbeheer

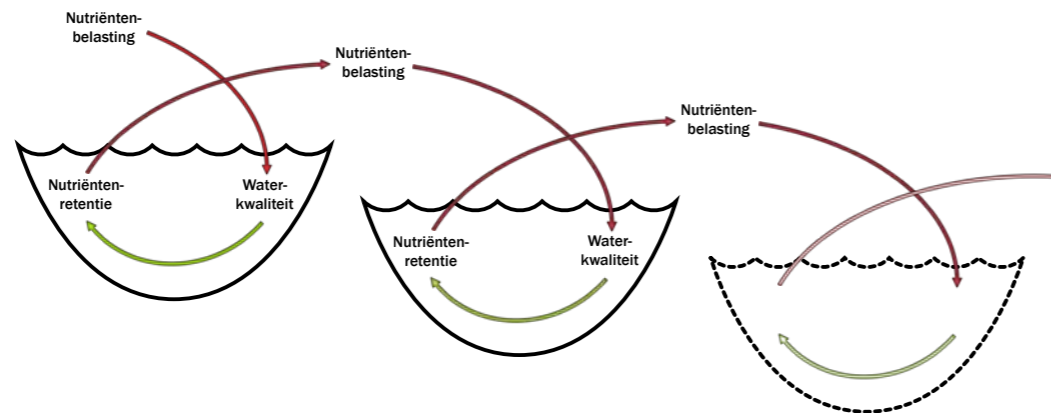
Foto Mark van Veen.
Laagveenplassen bij Kor-
tenhoef, met gele plomp
en waterlelie; onderdeel
van Natura 2000-gebied
Oostelijke Vechtplassen.

in te zetten op het land, waardoor nutriëntencycli in water-, bodem- en voedselssystemen beter worden gesloten (Tammeorg et al., 2024), hoewel dit vraagt om nader onderzoek (Van Wijk et al., 2021). In dit artikel gaan we dieper in op de wetenschappelijke onderbouwing van het SNRN-concept en de kansen voor toepassing in de Lage Landen. We bespreken de volgende stappen die nodig zijn om dit concept te vertalen naar de praktijk, in lijn met nationale en Europese richtlijnen voor grootschalig en integraal waterbeheer.

Waterplanten als indicator voor waterkwaliteit

Binnen de Kaderrichtlijn Water (KRW) streven EU-lidstaten ernaar om uiterlijk in 2027 een 'goede ecologische toestand' van oppervlakte- en grondwater te realiseren. Waterplanten spelen hierbij een cruciale rol als biologische indicator voor waterkwaliteit, doordat hun aanwezigheid direct samenhangt met de hoeveelheid nutriënten in het ecosysteem. Hoewel er sinds 1990 enig herstel zichtbaar is, blijft de score voor waterplanten in Nederland over het algemeen middelmatig tot laag (CLO, 2024). Naast de 741 KRW-waterlichamen die in Nederland structureel worden gemonitord, biedt burgerwetenschap de laatste jaren aanvullend inzicht

in de waterkwaliteit van duizenden kleinere wateren. In 2023 toonde onderzoek aan dat slechts 23% van de 3.292 onderzochte locaties voldoende onderwaterplanten bevatte, wat bijdroeg aan een onvoldoende algehele waterkwaliteitscore voor 78% van deze kleine wateren (Van Halsema & Teurlinckx, 2023). In Vlaanderen is de KRW-score voor waterplanten tussen 2007 en 2021 licht gestegen, al scoorde in de periode 2019-2021 slechts 26% van de 129 grote wateren goed (VMM, 2023). Om de ecologische waterkwaliteit te verbeteren, wordt vaak ingezet op vermindering van nutriëntenbelasting, onder andere door baggeren en een betere inrichting van waterlichamen (CLO, 2024). Het SNRN-concept voegt hier een dimensie aan toe door waterplanten niet alleen als indicator te beschouwen, maar ook als actief instrument in grootschalig waterkwaliteitsbeheer. Onderwaterplanten spelen immers een belangrijke rol in het vasthouden en hergebruiken van nutriënten, waardoor ze de impact van vermessing en eutrofiëring in benedenstroomse wateren kunnen verminderen (Van Wijk et al., 2021). Daarmee vormen ze een voorbeeld van een *Nature-based Solution*: een oplossing die gebruikmaakt van natuurlijke processen om meerdere maatschappelijke opgaven tegelijkertijd aan te pakken (LNV, 2024).



Figuur 1 Schematische weergave van ecologische interacties (negatieve koppeling donkerrood, positieve koppeling lichtgroen) en het resulterende domino-effect in een keten van meren. Nutriëntenbelasting heeft een negatief effect op ecologische waterkwaliteit, goede waterkwaliteit heeft een positief effect op nutriëntenretentie en vervolgens heeft nutriëntenretentie een negatief effect op benedenstroomse nutriëntenbelasting. Figuur gebaseerd op Van Wijk et al. (2021).

Figure 1 Schematic of ecological interactions (negative in dark red, positive in light green) and the resulting domino-effect in a chain of lakes. Nutrient loading has a negative effect on ecological water quality, good water quality has a positive effect on nutrient retention and, subsequently, nutrient retention has a negative effect on nutrient loading downstream. Figure based on Van Wijk et al. (2021).

Nutriëntenbeheer in ecologische netwerken

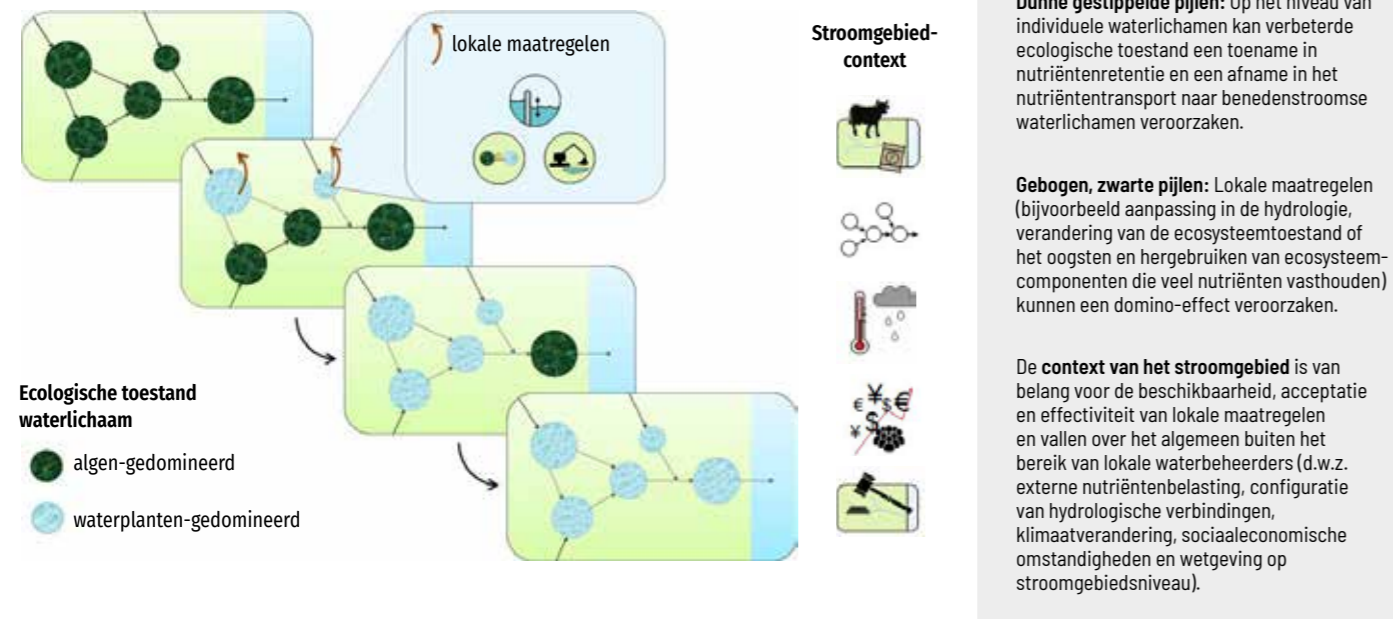
Het concept van Smart Nutrient Retention Networks (SNRN) is gebaseerd op ecologische interacties, waarbij twee koppelingen centraal staan: de interactie tussen nutriëntenbelasting en ecosysteemtoestand en de interactie tussen ecosysteemtoestand en nutriëntenretentie (figuur 1). Deze interacties zijn vooral bestudeerd in ondiepe meren, waarin een heldere toestand met onderwaterplanten en een troebele toestand gedomineerd door algen kunnen voorkomen (Scheffer et al., 1993). Veranderingen in nutriëntenbelasting kunnen geleidelijke of abrupte omslagen tussen deze ecosysteemtoestanden teweegbrengen (Jeppesen et al., 1990; Scheffer et al., 1993).

Bij een lage nutriëntenbelasting blijft een meer doorgaans helder, met een vegetatie van onderwaterplanten die zorgt voor efficiënte nutriëntenretentie en een goede waterkwaliteit. In contrast daarmee kunnen minder efficiënt nutriënten vasthouden wat tot waterkwaliteitsproblemen kan leiden (Hilt et al., 2017). Een grootschalige modelstudie van meer dan 3000 Chinese meren bevestigde dat een verlaging van de nutriëntenbelasting kan leiden tot een toename van onderwaterplanten en een verbeterde nutriëntenretentie (Van Wijk et al., 2024). In verbonden watersystemen betekent dit dat de ecologische toestand van bovenstroomse waterlichamen direct van invloed is op de nutriëntenbelasting van benedenstroomse ecosystemen. Hierdoor kan een ruimtelijk domino-effect ontstaan (figuur 1), waarbij een initiële verbetering van waterkwaliteit zich door het stroomgebied voortzet (Hilt et al., 2011; Van Wijk et al., 2021). Zo zou in sommige gevallen een reductie van vermessing tot grotere waterkwaliteitsverbeteringen kunnen leiden dan op het eerste gezicht verwacht wordt (Van Wijk et al., 2024). Het SNRN-concept stelt voor om ecologische en

hydrologische maatregelen binnen de ruimtelijke en temporele context van een stroomgebied te benutten om de nutriëntenretentie van het waternetwerk te vergroten (figuur 2). Bovenstroomse maatregelen, liggen wellicht het meest voor de hand, zoals het verminderen van nutriëntenbronnen en het herstel van natuurlijke oevers (o.a. door hermeandering en rivierverbreding), waarbij waterplanten gedijen (Janssen et al., 2019; Kail et al., 2015). Hydrologische maatregelen omvatten onder andere waterpeilbeheer, zoals het aanpassen van waterinlaat en -afvoer via sluizen en gemalen, en het doorspoelen met schoner water (Li et al., 2013). Tijdens het groeiseizoen van onderwaterplanten kan dit laatste bijvoorbeeld helpen om een troebel meer helder te maken (Hilt et al., 2011). Een praktijkvoorbeeld van verhoogde nutriëntenretentie, zij het als neveneffect, is het Nederlandse rijksprogramma 'Ruimte voor de Rivier', onderdeel van WB21 (Van Gerven et al., 2009). Dit programma richtte zich op het vergroten van de waterveiligheid door het creëren van verbindingen tussen rivieren en overstromingsvlaktes en het reconstrueren van natuurlijke waterlopen, waardoor water langer wordt vastgehouden (Van Gerven et al., 2009). De langere verblijftijd van water bevordert nutriëntenretentie doordat het contact tussen water en sediment toeneemt, wat leidt tot meer sedimentatie en denitrificatie (Saunders & Kalff, 2001).

Synergieën en tegenstrijdige effecten

Maatregelen om nutriëntenretentie te bevorderen en de ecologische kwaliteit van oppervlaktewateren te verbeteren – zoals het langer vasthouden van water versus het doorspoelen met relatief schoon water – kunnen elkaar zowel versterken als tegenwerken. Op basis van wetenschappelijke literatuur (Van Wijk et al., 2021) hebben we daarom enkele aandachtspunten voor de ontwikkeling van SNRN's ge-



Figuur 2 Verbetering van ecosysteemtoestand in een conceptueel Smart Nutrient Retention Network. Figuur gebaseerd op Van Wijk et al. (2021).

Figure 2 Ecological state improvement in a conceptual Smart Nutrient Retention Network. Figure based on Van Wijk et al. (2021).

identificeerd. Factoren die doorgaans bijdragen aan een hoge nutriëntenretentie zijn de aanwezigheid van (onder)waterplanten en een lange verblijftijd van water. Moerasgebieden (*wetlands*) vormen hier een goed voorbeeld van, aangezien ze gekenmerkt worden door zowel een hoge verblijftijd als een rijke vegetatie, wat resulteert in een efficiënte nutriëntenretentie. Tegelijkertijd kan een verhoogde doorstroming lokaal de waterkwaliteit verbeteren door algen weg te spoelen, maar dit brengt het risico met zich mee dat nutriënten zich ophopen in benedenstroomse gebieden. Daarnaast breekt algenbiomassa die lokaal geproduceerd of aangevoerd wordt uiteindelijk af, wat kan leiden tot zuurstofgebrek en het vrijkomen van fosfaat uit de waterbodem. Dit effect kan ook optreden bij thermische stratificatie, waarbij een koude laag onder een warme bovenlaag beperkt mengt, wat tot zuurstofarme condities kan leiden. Het voorkomen

van extreme algenbloei en stratificatie draagt daarom bij aan het vasthouden van fosfor (P) in watersystemen. Voor stikstof (N) speelt een andere uitdaging: hoewel denitrificatie stikstof uit het water verwijdert en zo de waterkwaliteit ten goede komt, betekent dit ook dat stikstof verdwijnt uit het systeem en niet langer beschikbaar is voor hergebruik. Door waterplanten, sediment of vis te oogsten en te (her)gebruiken, kan zowel de verwijdering van nutriënten uit het water als het sluiten van nutriëntencycli worden bevorderd. Wel moet worden voorkomen dat dergelijke ingrepen leiden tot ongewenste veranderingen in het ecosysteem, zoals verhoogde troebelheid door bodemverstoring of een drastische afname van waterplanten, waardoor algenbloei juist wordt bevorderd. Naast deze ecologische afwegingen spelen ook verschillen in retentieprocessen een rol bij de effectiviteit van maatregelen. Specifieke nutriënten worden

op uiteenlopende manieren vastgehouden (Maranger et al., 2018), waardoor interventies tegengestelde effecten kunnen hebben. Voor fosfor (P) is sedimentatie het belangrijkste retentieproces, terwijl stikstof (N) ook door denitrificatie uit het water kan worden verwijderd. Dit kan resulteren in een onevenwichtige nutriëntenretentie en veranderingen in de N:P-ratio, wat gevolgen kan hebben voor de intensiteit en toxiciteit van algenbloei (Harris et al., 2016). Een PCLake+ modelstudie suggereert dat meren die water met een lage N:P-ratio ontvangen, deze ratio verder kunnen verlagen, terwijl ze bij instroom van water met een hoge N:P-ratio deze juist verhogen (Van Wijk et al., 2024). Dit fenomeen wordt vermoedelijk beïnvloed door de toestand van het ecosysteem en de vraag welke nutriënten de primaire productie limiteren (Van Wijk et al., 2024). Uit een wereldwijde analyse van 5.622 meren blijkt bovendien dat de meeste meren sterker fosfor dan stikstof vasthouden, waardoor de N:P-ratio in oppervlaktewateren doorgaans toeneemt (Wu et al., 2022). De daadwerkelijke impact van dergelijke veranderingen hangt echter af van de karakteristieken van de benedenstroomse waterlichamen die dit water ontvangen. Daarom is een grondige systeemanalyse essentieel voor effectief waterkwaliteitsbeheer (Van Wijk et al., 2024). Voor de ontwikkeling van SNRN's is een grondige systeemanalyse nodig, met daarin een water- en nutriëntenbalans, de biologische samenstelling van de waterlichamen en te verwachten veranderingen daarin en sociaaleconomische kosten en baten (Lüring et al., 2016) (zie stroomgebiedcontext in figuur 2). Om een accurate nutriëntenbalans op te stellen, moet ook rekening worden gehouden met (langdurige) interne nalevering van fosfaat, een proces dat het herstel van de waterkwaliteit aanzienlijk kan vertragen (Søndergaard et al., 2001). Verder kunnen bepaalde organismen een bepalende invloed hebben op het ecosysteem, zoals karpers die de bodem omwoelen en ri-

vierkreeften die waterplanten beschadigen (CLO, 2024). Naast ecologische aspecten moeten ook sociaaleconomische en gezondheidsaspecten worden meegenomen. Een mogelijk aandachtspunt is de co-retentie van andere verontreinigende stoffen, die het hergebruik van geoogst materiaal kunnen belemmeren (Haynes & Zhou, 2022). Tegelijkertijd biedt het SNRN-concept kansen voor duurzame synergiën. Zo kan het verminderen van eutrofiëring en het stimuleren van waterplanten de uitstoot van broeikasgassen verlagen (Li et al., 2021; Aben et al., 2022), terwijl het creëren en herstellen van moerasachtige gebieden bijdraagt aan biodiversiteitsherstel (Mitsch et al., 2014). De publicatie over SNRN's (Van Wijk et al., 2021) onderstreept het belang van een zorgvuldige afweging van synergiën en mogelijke tegenstrijdige effecten bij waterkwaliteitsbeheer. Het SNRN-concept schrijft niet voor welke doelen binnen een waternetwerk centraal moeten staan, maar benadrukt het belang van heldere doelstellingen aan de voorkant. Dit kan variëren van maximale nutriëntenretentie in binnenwateren en een goede ecologische waterkwaliteit tot optimaal hergebruik van nutriënten of het minimaliseren van nutriëntenverliezen naar zee. Afhankelijk van de specifieke situatie kunnen deze doelen voor het gehele netwerk of specifieke waterlichamen elkaar versterken of juist met elkaar conflicteren, waardoor maatwerk en een gedegen systeemanalyse essentieel blijven.

Van theorie naar praktijk

Zodra de doelen zijn vastgesteld, kunnen SNRN-managementstrategieën worden ontwikkeld op basis van expertkennis en/of met behulp van modellen (Van Wijk et al., 2021). Hoe complexer het netwerk en de onderlinge ecologische interacties, hoe nuttiger ecosystemmodellen kunnen zijn bij het ontwikkelen van deze strategieën. Recentelijk zijn verschillende ecosystemmodellen ontwikkeld die toepasbaar zijn op

netwerken van meren (Kramer et al., 2023; Van Wijk et al., 2023). Deze modellen maken het mogelijk om de effecten van veranderingen in waterdoorstroming, nutriëntenbelasting en lokale waterkwaliteitsmaatregelen op de ecologische toestand en nutriëntenretentie binnen dergelijke netwerken te analyseren. Aquatische netwerkmodellen bieden waardevolle inzichten in terugkoppelingsmechanismen binnen en tussen ecosystemen, helpen bij het kwantificeren van nutriëntenbudgetten en ondersteunen bij het formuleren en testen van hypothesen en beheerstrategieën (Janssen et al., 2015; Teurlincx et al., 2019). Ze vormen daarmee een belangrijk instrument om de theoretische basis van SNRN's verder te ontwikkelen, praktijkvoorbeelden te evalueren en nieuwe beheeropties te verkennen.

Een voorbeeld van een toepassingsgebied voor het SNRN-concept en meer-netwerkmodellen zijn compacte merennetwerken, zoals de Friese meren (Nederland), Bokrijk (België) (Kramer et al., 2023) en de Randmeren (Nederland) (Scheffer et al., 2001; Ibelings et al., 2007). In een recente studie is het effect van een doorspoelingsregime in een netwerk van veertien meren in de Friese boezem (Nederland) doorgerekend met het ecosysteemmodel PCLakeS+ (Kramer, ongepubliceerd). Dit model kan omslagen tussen heldere en troebele toestanden in complexe netwerken van meren simuleren (Kramer et al., 2023). Sinds 2016 experimenteert Wetterskip Fryslân met het doorspoelen van de Friese boezem met relatief schoon water uit het IJsselmeer om de waterkwaliteit te verbeteren. Hoewel dit lokaal heeft geleid tot een toename van ondergedoken waterplanten langs sommige oevers, is het verwachte volledige herstel van waterplanten en helderheid tot op heden uitgebleven. Modelanalyses suggereren dat het doorspoelingsregime van 2020 op de lange termijn waarschijnlijk slechts voor één meer voldoende zal zijn om een volledige omslag naar een heldere toestand met waterplanten te bewerkstelligen. Daarnaast wijst

de studie op de relatief lage nutriëntenretentie van het merennetwerk, wat ertoe kan leiden dat extra doorspoeling in de huidige eutrofe situatie resulteert in een verhoogde nutriëntenafvoer naar het Lauwersmeer (Kramer, ongepubliceerd). Momenteel onderzoekt Wetterskip Fryslân met behulp van het PCLakeS+ model alternatieve (doorspoel)beheerstrategieën.

SNRN's als integrale benadering

Het voorbeeld van de Friese boezem illustreert hoe een integraal SNRN-perspectief kan helpen om onvoorziene neveneffecten van waterkwaliteitsmaatregelen te signaleren en alternatieve oplossingen te verkennen. Door beter inzicht te krijgen in de ruimtelijke gevolgen van doorspoeling in combinatie met een lage nutriëntenretentie, kan effectiever worden gestuurd op het voorkomen van afwenteling van nutriëntenproblematiek naar benedenstroomse gebieden (Tielrooij et al., 2000; Harbers & Heijen, 2022). Het SNRN-concept benadrukt dan ook dat waterkwaliteitsbeheer niet alleen gericht moet zijn op directe ingrepen in afzonderlijke waterlichamen, maar vooral ook op de bredere effecten van maatregelen op nutriëntenretentie binnen het gehele watersysteem. Nutriëntenretentie voorkomt namelijk afwenteling van nutriëntenvervuiling op benedenstroomse systemen. Dit sluit aan bij beleidsstrategieën zoals WB21 en de Nationale Omgevingsvisie (NOVI), die inzetten op het voorkomen van afwenteling en het vasthouden en bergen van water voordat het wordt afgevoerd. Hoewel de WB21-strategie primair gericht is op waterkwantiteitsbeheer, draagt een langere verblijftijd van water ook bij aan een hogere nutriëntenretentie. Een belangrijke voorwaarde binnen het SNRN-concept is echter dat de waterkwaliteit gewaarborgd blijft. Een te lange verblijftijd in combinatie met hoge nutriëntenconcentraties kan leiden tot algenbloei en een afname van de nutriëntenretentiecapaciteit (Van Wijk

et al., 2021; Coops & Hosper, 2002). Dit onderstreept de noodzaak van een zorgvuldig gebalanceerd beheer waarin zowel waterkwaliteit als nutriëntenretentie worden meegenomen.

Een stroomgebiedsperspectief voor de toekomst

Het SNRN-concept biedt een raamwerk om het complexe nutriëntenprobleem op grotere ruimtelijke schaal aan te pakken door middel van geïntegreerd waterkwaliteitsbeheer. De focus ligt hierbij op het benutten van de interactie tussen nutriëntenretentie en ecosysteemtoestand om een duurzamer nutriëntenbeheer binnen het gehele stroomgebied te realiseren (Van Wijk et al., 2021). Dit stroomgebiedsperspectief biedt kansen voor strategische maatregelen die niet alleen

gericht zijn op het reduceren van nutriëntenbronnen op land of het verbeteren van individuele waterlichamen, maar ook op het vasthouden en hergebruiken van nutriënten op tactische locaties binnen het watersysteem. Hoewel een dergelijke benadering complex is en vraagt om gedetailleerde analyses van ecologische interacties, biedt het tegelijkertijd kansen om tijd en middelen efficiënter in te zetten door maatregelen doelgericht te implementeren. De ontwikkeling van het SNRN-concept is daarmee een belangrijke stap vooruit in de verduurzaming van waterkwaliteits- en nutriëntenbeheer op grote schaal. De volgende uitdaging is het vertalen van deze inzichten naar concrete SNRN-managementstrategieën en implementatie in de praktijk, waarmee een bijdrage wordt geleverd aan een duurzamer en veerkrachtiger watersysteem.

Summary

Smart Nutrient Retention Networks. Opportunities for sustainable water quality and nutrient management

Dianneke van Wijk, Lilith Kramer & Wolf Mooij

[Ecological feedbacks, hydrological networks, models, nutrient retention, water quality](#)

Nutrients are essential resources for food production that are lost into oceans but also pollute surface waters. The 'Smart Nutrient Retention Network' (SNRN) concept has been developed to deal with this dual nutrient challenge beyond the level of individual waterbodies. It provides a novel direction for water quality management, focused on retention and reuse of nutrients in connected waterbodies. In SNRNs submerged water plants function as a Nature-based Solution as, through ecological interactions, they help to retain nutrients and to prevent downstream nutrient pollution. These interactions can cause a domino-effect of changes in water quality in hydrological networks. Combinations

of ecological and hydrological interventions within the context of the catchment may enhance nutrient retention and stimulate this potential domino-effect of improved water quality. Moreover, this offers potential for nutrient harvest and reuse. Careful analysis of connected water systems, including water and nutrient flows, biological make-up and interactions, and social-economic aspects is needed for the holistic development of SNRNs to improve water quality and nutrient management. Currently, lake ecosystem models are available and ready to be applied to such connected lake systems to advance the knowledge base for SNRNs and to design management strategies up to the catchment scale.

Literatuur

Aben, R.C.H., Velthuis, M., Kazanjian, G., Frenken, T., Peeters, E.T.H.M., Van de Waal, D.B., ... Kosten, S. (2022). Temperature response of aquatic greenhouse gas emissions differs between dominant plant types. *Water Research* 226, 119251.

Boesch, D.F. (2002). Challenges and opportunities for science in reducing nutrient over-enrichment of coastal ecosystems. *Estuaries* 25, 886-900.

Chislock, M.F., Doster, E., Zitomer, R.A. & Wilson, A.E. (2013). Eutrophication: Causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Nature Education Knowledge* 4(4), 10.

CLO (2024). *Natuurkwaliteit van waterplanten in oppervlaktewater, 1990–2022*. Compendium van de Leefomgeving. www.clo.nl/indicatoren/nl144106-natuurkwaliteit-van-waterplanten-in-oppervlaktewater-1990-2022 (geraadpleegd 22 juli 2024).

Coops, H. & Hosper, S.H. (2002). Water-level management as a tool for the restoration of shallow lakes in the Netherlands. *Lake and Reservoir Management* 18(4), 293-298.

Cordell, D., Drangert, J.O. & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change* 19(2), 292-305.

De Jonge, V.N., Elliott, M. & Orive, E. (2002). Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. In: Orive, E., Elliott, M., De Jonge, V.N. (Eds.). *Nutrients and eutrophication in estuaries and coastal waters*. Springer, 1-19.

Harbers, M.G.J. & Heijen, V.L.W.A. (2022). *Brief regering: Water en Bodem sturend*. www.tweede-kamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2022D50136&did=2022D50136 (geraadpleegd 17 februari 2025).

Harris, T.D., Smith, V.H., Graham, J.L., Van de Waal, D.B., Tedesco, L.P. & Clercin, N. (2016). Combined effects of nitrogen to phosphorus and nitrate to ammonia ratios on cyanobacterial metabolite concentrations in eutrophic midwestern USA reservoirs. *Inland Waters* 6(2), 199-210.

Haynes, R.J., & Zhou, Y.-F. (2022). Retention of heavy metals by dredged sediments and their management following land application. *Advances in Agronomy* 171, 91-254.

Hilt, S., Brothers, S., Jeppesen, E., Veraart, A.J. & Kosten, S. (2017). Translating regime shifts in shallow lakes into changes in ecosystem functions and services. *BioScience* 67(10), 928-936.

Hilt, S., Köhler, J., Kozerski, H.P., Van Nes, E.H. & Scheffer, M. (2011). Abrupt regime shifts in space and time along rivers and connected lake systems. *Oikos* 120(5), 766-775.

Ibelings, B.W., Portielje, R., Lammens, E.H., Noordhuis, R., Van den Berg, M.S., Jooisse, W. & Meijer, M.L. (2007). Resilience of alternative stable states during the recovery of shallow lakes from eutrophication: Lake Veluwe as a case study. *Ecosystems* 10, 4-16.

Janssen, A.B.G., Arhonditsis, G.B., Beusen, A., Bolding, K., Bruce, L., Bruggeman, J., ... Mooij, W.M. (2015). Exploring, exploiting and evolving diversity of aquatic ecosystem models: A community perspective. *Aquatic Ecology* 49, 513-548.

Janssen, A.B.G., Hilt, S., Kosten, S., De Klein, J.M., Paerl, H.W. & Van de Waal, D.B. (2020). Shifting states, shifting services: Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. *Freshwater Biology* 66(1), 1-12.

Janssen, A.B.G., Van Wijk, D., Van Gerven, L.P., Bakker, E.S., Brederveld, R.J., DeAngelis, D.L., ... Mooij, W.M. (2019). Success of lake restoration depends on spatial aspects of nutrient loading and hydrology. *Science of the Total Environment* 679, 248-259.

Jeppesen, E., Jensen, J., Kristensen, P., Søndergaard, M., Mortensen, E., Sortkjær, O. & Orlík, K. (1990). Fish manipulation as a lake restoration tool in shallow, eutrophic, temperate lakes 2: Threshold levels, long-term stability and conclusions. Biomaniipulation tool for water management. *Hydrobiologia* 200/201, 219-227.

Kail, J., Brabec, K., Poppe, M., & Januschke, K. (2015). The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: A meta-analysis. *Ecological Indicators* 58, 311-321.

Kramer, L., Troost, T.A., Janssen, A.B.G., Brederveld, R.J., Van Gerven, L.P.A., Van Wijk, D., ... Teurlinckx, S. (2023). Connecting lakes: Modeling flows and interactions of organisms and matter throughout the waterscape. *Environmental Modelling & Software* 167, 105765.

Li, Y., Shang, J., Zhang, C., Zhang, W., Niu, L., Wang, L. & Zhang, H. (2021). The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review. *Science of the Total Environment* 768, 144582.

Li, Y., Tang, C., Wang, C., Anim, D.O., Yu, Z. & Acharya, K. (2013). Improved Yangtze River diversions: are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? *Ecological Engineering* 51, 104-116.

Lürling, M., Mackay, E., Reitzel, K. & Spears, B.M. (2016). Editorial—a critical perspective on geo-engineering for eutrophication management in lakes. *Water Research* 97, 1-10.

Maranger, R., Jones, S.E. & Cotner, J.B. (2018). Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus through the freshwater pipe. *Limnology and Oceanography Letters* 3(3), 89-101.

LNV (2024). Beleidskompas: Nature-based Solutions. Ministerie van LNV. www.kcbr.nl (geraadpleagd 15 november 2024).

Mitsch, W.J., Zhang, L., Waletzko, E. & Bernal, B. (2014). Validation of the ecosystem services of created wetlands: two decades of plant succession, nutrient retention, and carbon sequestration in experimental riverine marshes. *Ecological Engineering* 72, 11-24.

Rodrigues, J.M.G. (2015). Cultural services in aquatic ecosystems. Ecosystem services and river basin ecohydrology. In: Chicharo, L., Müller, F. & Fohrer, N. (Eds.) *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology*. Springer, 35-56.

Saunders, D.L. & Kalff, J. (2001). Nitrogen retention in wetlands, lakes and rivers. *Hydrobiologia* 443(1-3), 205-212.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 41, 591-596.

Scheffer, M., Hosper, S.H., Meijer, M.-L., Jeppesen, E. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology & Evolution* 8(8), 275-279.

Søndergaard, M., Jensen, P.J., & Jeppesen, E. (2001). Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World Journal* 1, 427-442.

Tammeorg, O., Chorus, I., Spears, B., Nöges, P., Nürnberg, G.K., Tammeorg, P., ... Lürling, M. (2024). Sustainable lake restoration: from challenges to solutions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 11(2), e1689.

Teurlinckx, S., Van Wijk, D., Mooij, W.M., Kuiper, J.J., Huttunen, I., Brederveld, R.J., ... Janssen, A.B.G. (2019). A perspective on water quality in connected systems: Modelling feedback between upstream and downstream transport and local ecological processes. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 40, 21-29.

Tielrooij, F., Van Dijk, J., De Blécourt-Maas, J., Van den Ende, A., Oosterbaan, G.A. & Overbeek, H.J. (2000). *Waterbeleid voor de 21e eeuw. Geef water de ruimte en de aandacht die het verdient. Advies van de Commissie Waterbeheer 21e eeuw*.

Van Gerven, L.P.A., Kuiper, J.J., Janse, J.H., Janssen, A.B.G., Jeuken, M., Mooij, W.M. & De Klein, J.J.M. (2017). How regime shifts in connected aquatic ecosystems are affected by the typical downstream increase of water flow. *Ecosystems* 20, 733-744.

Van Halsema, R. & Teurlinckx, S. (2023). *Inzicht in kwaliteit van kleine wateren: Burgeronderzoek “Vang de Watermonsters” vult de blinde vlekken in ecologische waterkwaliteit op de kaart*. Natuur & Milieu.

Van Wijk, D., Chang, M., Janssen, A.B.G., Teurlinckx, S. & Mooij, W.M. (2023). Regime shifts in shallow lakes explained by critical turbidity. *Water Research* 242, 119950.

Van Wijk, D., Janse, J.H., Wang, M., Kroeze, C., Mooij, W.M. & Janssen, A.B.G. (2024). How nutrient retention and TN:TP ratios depend on ecosystem state in thousands of Chinese lakes. *Science of The Total Environment* 918, 170690.

Van Wijk, D., Teurlinckx, S., Brederveld, R.J., De Klein, J.J.M., Janssen, A.B.G., Kramer, L., ... Mooij, W.M. (2021). Smart Nutrient Retention Networks: a novel approach for nutrient conservation through water quality management. *Inland Waters* 12(1), 138-153.

VMM (2023). *Macrofyten*. Vlaamse Milieumaatschappij. www.vmm.be/water/kwaliteit-waterlopen/macrofyten (geraadpleegd 12 november 2024).

Wu, Z., Li, J., Sun, Y., Peñuelas, J., Huang, J., Sardans, J., ... Liu, Y. (2022). Imbalance of global nutrient cycles exacerbated by the greater retention of phosphorus over nitrogen in lakes. *Nature Geoscience* 15(6), 464-468.