
Verbeterde inschatting fosfornalevering in De Stichtse Rijnlanden

Nikki Dijkstra¹, Henk van Hardeveld²,
Bas Spanjers³ en Alfons Smolders⁴

De onderwaterbodem kan een belangrijke fosforbron zijn in sloten. Vandaar dat Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden voor deze wateren de fosfornalevering uit de slootbodem heeft gekwantificeerd. De gebruikte methoden zijn relatief goedkoop en geven ook andere waterbeheerders de kans om aan de slag te gaan met de kwantificering van deze fosforbron. Ondanks onzekerheden en verbeterpunten zorgt de kwantificering voor een duidelijke verbetering van de mogelijkheden om fosforbalansen op te stellen. Daardoor is de aanstaande generatie KRW-maatregelen aanzienlijk beter te onderbouwen.

Inleiding

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) maakt nutriëntenbalansen voor haar beheergebied om gericht maatregelen te kunnen nemen ter verbetering van de waterkwaliteit. Dit is belangrijk omdat niet alle wateren in het beheergebied van HDSR voldoen aan de eisen van de Kaderrichtlijn Water (KRW) (Van de Kamp en Blom, 2011). In sloten in het landelijke gebied zijn vooral te hoge fosforconcentraties (in de vorm van fosfaat) een probleem. Deze hoge fosforconcentraties worden waarschijnlijk deels veroorzaakt door de nalevering van fosfor vanuit de slootbodem naar het oppervlaktewater. Inzicht in de omvang van deze bron is nodig om in te schatten hoe de verschillende fosforbronnen zich tot elkaar verhouden. Alleen dan zijn gericht maatregelen te nemen. Bij een hoge nalevering uit de slootbodem zou zelfs bij een reductie van andere fosforbronnen de fosforconcentratie dusdanig hoog blijven dat een gezondere ecologische waterkwaliteit nauwelijks haalbaar is (Poelen e.a., 2012).

Er is echter in het beheergebied nog weinig bekend over deze interne fosforbron. Daarom is een onderzoek verricht, met als doel de fosfornalevering vanuit de slootbodems te kunnen voorspellen. Hiermee wil het waterschap meer grip krijgen op de bijdrage van fosfornalevering uit de slootbodem op de totale fosforbalans. Daarnaast zijn er vuistregels opgesteld om de nalevering in andere sloten in te kunnen schatten.

¹ Universiteit Utrecht, Utrecht (n.dijkstra@uu.nl)

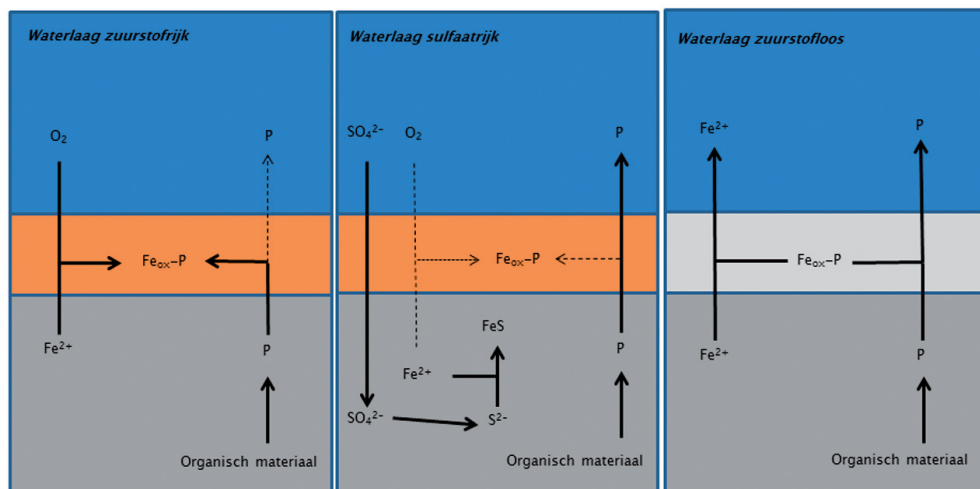
² Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Houten (hardeveld.ha@hdsr.nl)

³ Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Houten (spanjers.b@hdsr.nl)

⁴ Onderzoekscentrum B-WARE, Nijmegen (A.Smolders@science.ru.nl)

Fosfornalevering

Fosfor dat uit de percelen spoelt en in de bodem terecht komt, kan op een ander tijdstip weer worden nageleverd aan de waterlaag. Dit proces wordt ook wel interne eutrofiëring genoemd (Smolders e.a., 2006). De mechanismen achter fosfornalevering zijn complex. Vooral de interacties tussen fosfor (P), ijzer (Fe), zwavel (S), zuurstof (O_2) en organisch materiaal spelen een belangrijke rol (zie afbeelding 1). Het organisch materiaal bestaat uit dode algen, plantenresten en uit (deels) afgebroken veen. Door diverse redox-processen vindt afbraak van organisch materiaal plaats in de slootbodembodem, waarbij fosfor vrijkomt in de slootbodembodem. We noemen dit mineralisatie. Onder zuurstofrijke omstandigheden treedt enkel uitwisseling van vrij fosfor op tussen slootbodembodem en waterkolom wanneer de molaire fosforconcentratie van het poriewater van de slootbodembodem hoger is dan de ijzerconcentratie. Dit komt omdat fosfor bindt aan ijzerhydroxide (Fe_{ox}) dat wordt gevormd op de overgang van de zuurstofloze slootbodembodem naar de zuurstofhoudende waterlaag. Dit wordt de ijzerval genoemd (afbeelding 1, links). Een hoge sulfaatbelasting kan leiden tot de immobilisatie van ijzer in de slootbodembodem. Wanneer als gevolg van sulfaatreductie sulfide wordt gevormd gaat dit een verbinding aan met ijzer waarbij slecht oplosbare ijzersulfides (waaronder pyriet) worden gevormd. Deze sulfaatreductie verloopt met name goed in meer organische bodems. Hierdoor neemt de ijzerconcentratie van het poriewater af en kan er ook veel minder ijzer worden geoxideerd in de toplaag van de slootbodembodem. De fosfornalevering kan hierdoor sterk toenemen. De ijzerval werkt niet meer omdat er onvoldoende ijzer beschikbaar is (afbeelding 1, midden). Onder zuurstofloze omstandigheden werkt de ijzerval ook niet meer, ongeacht de ijzerconcentratie van het poriewater. Bovendien kan als gevolg van ijzerreductie de binding van fosfor aan de ijzercomplexen in de toplaag van de bodem worden verbroken. We noemen dit desorptie (afbeelding 1, rechts).



Afbeelding 1: Mechanismen fosfornalevering in sloten (blauw: waterlaag; oranje: zuurstofrijke toplaag sediment; licht- en donkergrijs: zuurstofloze laag sediment).

Aanpak

De basis voor het onderzoek vormden monsters van de waterbodem, waarvan in het laboratorium de concentraties werden bepaald. Door randvoorwaarden als tijd en kosten was het aantal monsterlocaties gelimiteerd tot 48. De monsterlocaties zijn bepaald met een kanssteekproef, waardoor meer informatie kon worden verkregen over de spreiding van de onderzochte variabelen in het gebied. Daarnaast staat door de kanssteekproef de locatiekeuze minder snel ter discussie; er is immers niet gekozen voor een mooie en/of gemakkelijk bereikbare locatie. De uiteindelijke kanssteekproef was een eenvoudige gestratificeerde aselechte steekproef, waarbij het gehele gebied werd opgedeeld in deelgebieden (strata). Indien deze deelgebieden homogeen zijn, kan een gestratificeerde steekproef namelijk efficiënter zijn dan een normale kanssteekproef (De Gruijter e.a., 2006). Bijkomend voordeel van een gestratificeerde steekproef is dat het ook informatie oplevert over de afzonderlijke deelgebieden en verschillen tussen de deelgebieden.

Om zo homogeen mogelijke deelgebieden te verkrijgen (met betrekking tot de fosforlevering) werd het beheergebied opgedeeld op basis van bodemtype, landgebruik en geohydrologie. De veronderstelling was dat deze variabelen mogelijk verband houden met de fosforlevering. Om de variatie in sloten enigszins in te perken zijn enkel landelijke sloten meegenomen in dit onderzoek; sloten binnen het stedelijk gebied en/of binnen 10 meter van huizen en geasfalteerde wegen werden uitgesloten. Ook de Utrechtse Heuvelrug is niet geanalyseerd, omdat hier nauwelijks oppervlaktewater voorkomt. Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende deelgebieden en hun eigenschappen. In het slotennetwerk van de deelgebieden zijn met behulp van de “random point generator” in ArcView uiteindelijk per deelgebied random monsterlocaties geselecteerd.

Deelgebied	Bodemtype	Landgebruik	Geohydrologie	Aantal locaties
1	Koopveen	Grasland (of akker)	Neutraal	6
2	Weideveen	Grasland (of akker)	Neutraal	6
3	Klei op veen	Grasland (of akker)	Neutraal	6
4	Klei op veen	Grasland (of akker)	Kwel > 0,5 mm/dag	6
5	Klei	Grasland (of akker)	Neutraal	6
6	Zavel	Grasland (of akker)	Neutraal	6
7	Zavel	Grasland (of akker)	Wegzijging > 0,5 mm/dag	6
8	Klei	Fruitteelt	Neutraal	6

Tabel 1: De deelgebieden en hun eigenschappen.

In maart 2012 zijn op alle locaties slootbodem- en watermonsters genomen. De monsters van de slootbodem werden daarbij in een luchtdichte zak getransporteerd. Later werd het bodemvocht aan de slootbodems onttrokken met behulp van Rhizons (Eijkelpark, Agrisearch Equipment).

In het laboratorium van B-ware werd uiteindelijk het met 65% salpeterzuur (0.2 ml per 20 ml) aangezuurde bodemvocht en oppervlaktewater geanalyseerd op totaalconcentraties met behulp van een optische emissie spectroscopie (ICP-OES). Na destructie van 200 mg gemalen slootbodem met 4 ml salpeterzuur en 1 ml waterstof peroxide in een destructie

magnetron (Milestone Microwave Type MIs 1200 Mega) werden ook deze monsters geanalyseerd op de ICP-OES. Naast fosfor- en ijzerconcentraties zijn ook andere totaalconcentraties gemeten, zoals calcium en zwavel. Verder zijn er met behulp van een Bran en Luebbe auto-analyzer 2 nitraat-, ammonium- en fosfaatconcentraties van niet aangezuurde water- en bodemvochtmonsters bepaald. Door oxidatie-artefacten in de niet aangezuurde monsters (neerslag van aan ijzer-gebonden fosfaat) werden de fosfaatconcentraties niet goed gemeten en is enkel totaal fosfor gebruikt als indicatie voor de fosforconcentraties (in de vorm van fosfaat) in het oppervlaktewater en bodemvocht. Om het organischestofgehalte in de slootbodems te bepalen werden gedroogde bodemmonsters voor 4 uur uitgedroogd bij 550 °C, waarbij het gewichtsverlies een indicatie was voor het organischestofgehalte (Geurts e.a., 2010). De bodemdichtheid werd bepaald door de bodems te wegen in potten met een bekend volume en gewicht. Er zijn dus vele (grotendeels) chemische variabelen gemeten. Deze variabelen zijn gebruikt om meer inzicht krijgen in de mechanismen achter de nalevering en maakten het mogelijk vuistregels voor fosfornalevering op te stellen.

Uit de literatuur zijn twee methoden bekend om de nalevering onder zuurstofrijke omstandigheden te schatten. De methode van Geurts e.a. (2010) correleert de fosfornalevering met de bodemvocht-fosforconcentratie. Daarnaast dienen de bodemvocht ijzer:fosfor-ratio (Fe:P-ratio) en de slootbodem ijzer:zwavel-ratio (Fe:S-ratio) als drempelwaarden voor de nalevering. Deze ratio's weerspiegelen de potentiële bindingscapaciteit van de slootbodem (voor de binding van fosfor aan ijzer). Zolang de waterlaag zuurstofrijk is wordt nalevering alleen mogelijk geacht als de Fe:P-ratio van het poriewater kleiner is dan 1,0 mol/mol. Daarnaast correleert de slootbodem Fe:S-ratio sterk met de bodemvocht Fe:P-ratio: bij een bodem Fe:S-ratio boven 1,0 mol/mol was de bodemvocht Fe:P-ratio veelal ook hoger dan 1,0 mol/mol. De uiteindelijke correlatieformule is (Geurts e.a., 2010):

Fosfornalevering = $(0,22 * \text{bodemvocht fosfor} - 0,59)/365 \times 30,97$, *tenzij Fe:P > 1 (dan 0)*

Een tweede methode is door Poelen e.a. (2012) ontwikkeld in het Baggernut-project. Ook in dit project is een correlatie tussen de fosfornalevering en de fosforconcentratie van het bodemvocht gevonden. In deze methode wordt er niet apart rekening gehouden met de interactie tussen fosfor en ijzer. De formule is:

Fosfornalevering = $0,00006 * \text{bodemvocht fosfor}^2 + 0,0105 * \text{bodemvocht fosfor} + 0,1473$

In beide formules is de fosfornalevering uitgedrukt in mg P/m²/dag en de fosforconcentratie van het bodemvocht in µmol P/l.

Gemiddelde en standaarddeviaties per deelgebied zijn berekend met SPSS 10. Daarnaast werden verschillen tussen de deelgroepen in bodemvocht-fosfor, de bodemvocht Fe:P-ratio en de bodem Fe:S-ratio getest op significantie met Mann-Whitney U toetsen ($\alpha=0.05$). Deze non-parametrische toets werd toegepast omdat de student's t-toets uitgaat van een normaal-gedistribueerde dataset (De Vocht, 2008) en de onderzochte variabelen niet normaal gedistribueerd waren ($p<0.001$; kolmogorov-Smirnov & Shapiro-Wilk test).

Resultaten

Zoals tabel 2 en afbeeldingen 2 en 3 aangeven varieert de (gemiddelde) voorspelde nalevering tussen de 0,0 en 2,0 mg P/m² oppervlaktewater/dag. De standaarddeviatie per deelgebied is doorgaans groot. Desondanks maken de resultaten duidelijk dat het bodemtype en de geohydrologie (kwel) van invloed zijn op de nalevering. Vooral de bodemvocht Fe:P-ratio en bodem Fe:S-ratio zijn veel lager in de veengebieden (deelgebieden 1 en 2) dan in de klei- en zavelgebieden (deelgebieden 5 en 6) ($p < 0.001$). Daarnaast verschilt de bodemvocht-fosforconcentratie in het kwelgebied (deelgebied 4) significant van het gebied zonder kwel (deelgebied 3) ($p < 0.005$). Ook het fruitteelt gebied lijkt een lagere bodemvocht-fosforconcentratie en hogere Fe:P-ratio te hebben ($p = 0.0065$).

Deel- gebied	Bodemvocht fosfor (mg/l)	Bodemvocht Fe:P-ratio (mol/mol)	Slootbodem Fe:S-ratio (mol/mol)	Fosfornalevering methode Geurts (mg P/m ² /dag)	Fosfornalevering methode Poelen (mg P/m ² /dag)
1	1,62 (0,6)	0,52 (0,8)	0,42 (0,2)	0,7 (0,5)	0,9 (0,3)
2	2,02 (2,1)	0,22 (0,2)	0,41 (0,1)	1,2 (1,2)	1,3 (1,6)
3	2,16 (0,7)	1,43 (1,2)	0,88 (0,7)	0,7 (0,7)	1,1 (0,4)
	3,62 (3,5)*	1,30 (1,1)*	0,90 (0,6)*	1,6 (2,3)*	2,6 (3,7)*
4	0,73 (0,3)	16,67 (15,7)	2,41 (2,7)	0,0 (0,0)	0,4 (0,1)
5	3,14 (1,8)	5,84 (5,9)	3,00 (2,3)	0,5 (1,2)	2,0 (1,3)
6	1,62 (1,4)	3,84 (3,8)	4,01 (4,02)	0,4 (0,9)	1,0 (0,8)
7	1,54 (1,9)	17,62 (19,9)	9,50 (11,3)	0,1 (0,2)	1,0 (1,3)
8	1,22 (0,8)	26,31 (32,5)	2,51 (1,5)	0,0 (0,0)	0,7 (0,4)

*: inclusief monsterlocatie in de Keulevaart)

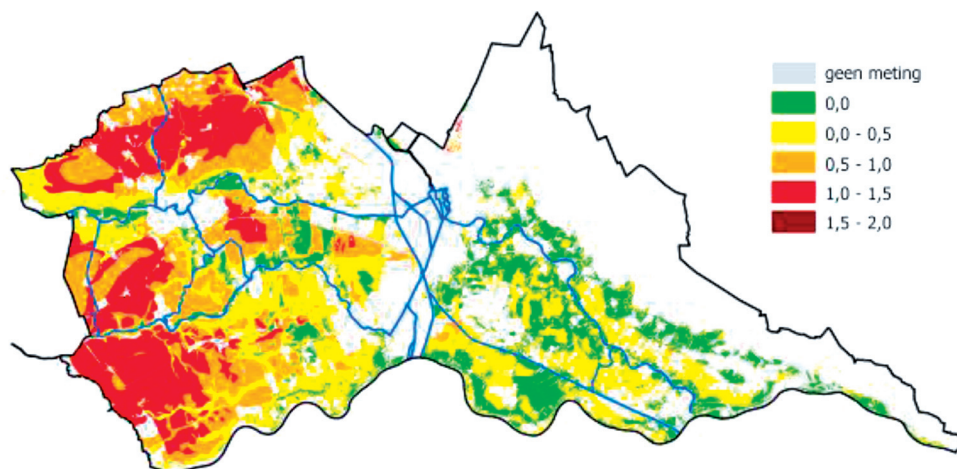
Tabel 2: Gemiddelde meetwaarden en fosfornalevering volgens methoden Geurts en Poelen per deelgebied (standaarddeviaties van de steekproef staan tussen haakjes).

Een monsterlocatie van deelgebied 3 had een erg hoge bodemvocht-fosforconcentratie (6,3 mg/l), welke 3 tot 4 maal hoger was dan de bodemvocht-fosforconcentraties op de andere monsterlocaties in hetzelfde deelgebied. Dit komt waarschijnlijk doordat de locatie zich in polder de Keulevaart bevindt, in het zuidwesten van het beheergebied. Dit gebied staat bekend om de grote eutrofiëringsproblemen (zie Smolders e.a. (2011) voor meer informatie). Vandaar dat deze locatie beter als een afzonderlijk deelgebied kan worden beschouwd. In de figuren zijn daarom de gemiddelden voor deelgebied 3 enkel berekend op basis van de andere 5 locaties.

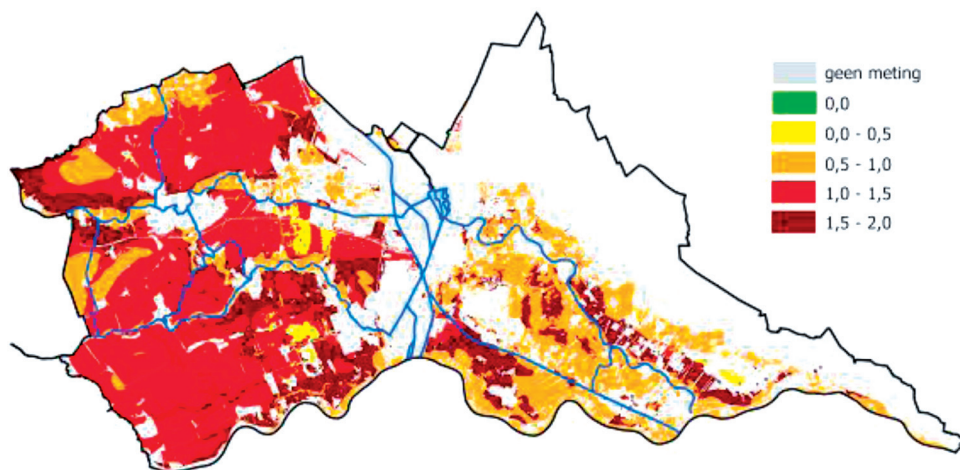
De methode van Geurts e.a. (2010) voorspelt vrij weinig nalevering voor het oostelijke zavel- en kleigebied (deelgebieden 5-8), terwijl de methode van Poelen e.a. (2012) voor deze gebieden een aanzienlijk hogere nalevering voorspelt. Voor de veengebieden voorspellen beide methodes een hoge nalevering (deelgebied 1-3). Verder blijkt dat de voorspelde nalevering relatief laag is voor de deelgebieden met fruitteelt (deelgebied 8) en met ijzerrijke kwel (deelgebied 4). Volgens de methode van Geurts treedt onder die omstandigheden zelfs helemaal geen nalevering op want de Fe:P ratio is lager dan 1,0 mol/mol.

Wij achten de methode van Geurts het meest geschikt voor het beheergebied van HDSR.

Deze methode houdt door middel van de drempelwaarden namelijk meer rekening met de bindingcapaciteit van ijzer in de slootbodems. De dataset waarop de methode van Poelen is gebaseerd kent weinig locaties met hoge ijzerconcentraties in de bodem. Er zijn echter wel hoge ijzerconcentraties ($> 12 \text{ mg/l}$) in het beheergebied van HDSR gevonden, voornamelijk in de klei- en zavelgebieden in het oostelijke deel.



Afbeelding 2: Gemiddelde fosfornalevering per deelgebied ($\text{mg P/m}^2/\text{dag}$) volgens de formule van Geurts.

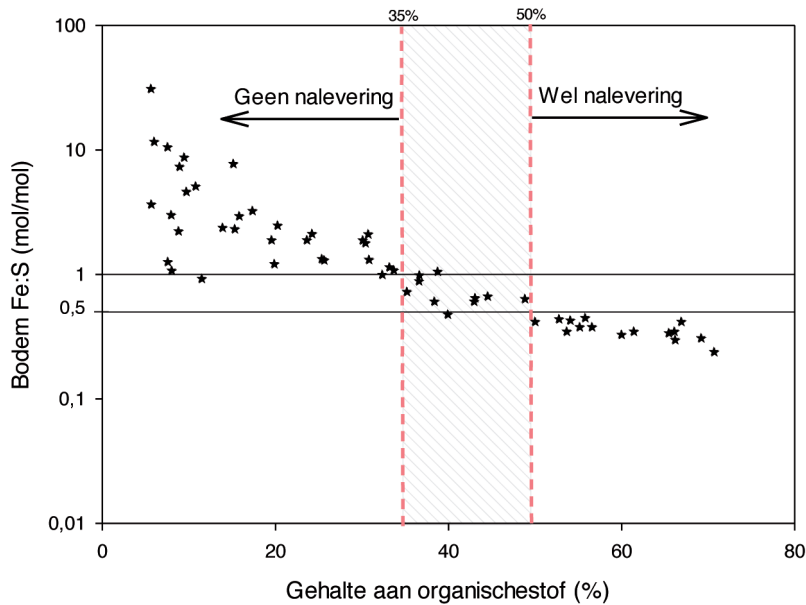


Afbeelding 3: Gemiddelde fosfornalevering per deelgebied ($\text{mg P/m}^2/\text{dag}$) volgens de formule van Poelen.

Vuistregels

Naast de kwantificering van de gemiddelde nalevering per deelgebied is ook gekeken naar eenvoudig te meten parameters die kunnen indiceren of er al dan niet nalevering optreedt. Het bleek dat veel chemische eigenschappen in de waterkolom, het bodemvocht en de slootbodem sterk samenhangen met de Fe:P-ratio in het bodemvocht en de Fe:S-ratio in de slootbodem. Uitgaande van drempelwaarden voor deze ratio's volgens

Geurts e.a. (2010) kunnen deze relatief gemakkelijk te bepalen chemische eigenschappen al een indicatie geven voor de kans op nalevering. Dit wordt hieronder duidelijk gemaakt aan de hand van een voorbeeld.



Afbeelding 4: Samenhang tussen de bodem Fe:S-ratio en het gehalte aan organischestof.

Afbeelding 4 geeft de samenhang tussen het organischestofgehalte en de Fe:S-ratio van de bodem weer. Bij een Fe:S-ratio in de bodem lager dan 0,5 mol/mol wordt de fosforbinding van de slootbodem erg klein geacht. Onder die omstandigheden kan dus nalevering optreden. Bij ratio's tussen 0,5 en 1,0 mol/mol blijkt de nalevering moeilijk voorspelbaar, terwijl ratio's boven 1,0 mol/mol dermate veel fosforbinding indiceren dat er waarschijnlijk geen nalevering optreedt (Smolders e.a. 2012). Bijna geen enkele slootbodem met een laag organischestofgehalte (onder 35%) had een Fe:S-ratio in de bodem onder de drempelwaarde van 1,0 mol/mol. Voor de onderzochte bodems indiceren lage organischestofgehaltenes dus dat fosfornalevering waarschijnlijk geen rol speelt. In organische bodems (organischestofgehalte > 50%) is waarschijnlijk wel sprake van nalevering.

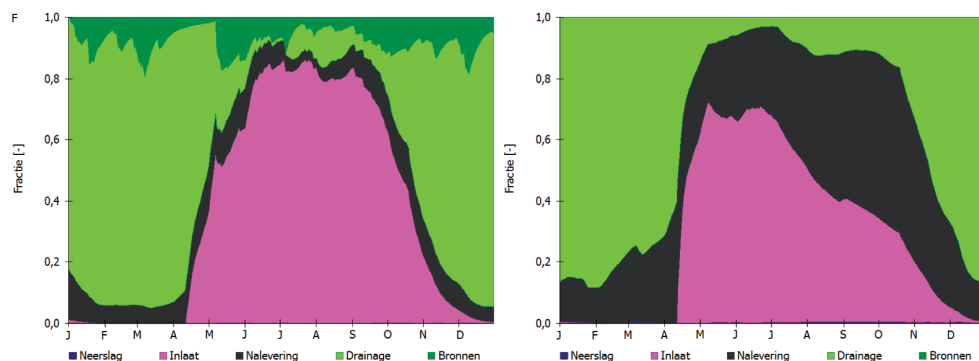
Als	Dan (mol/mol)	Dus waarschijnlijk
organischestofgehalte > 50%	Bodem Fe:S < 0,5	Nalevering
organischestofgehalte < 35 %	Bodem Fe:S > 1,0	Geen nalevering
slibdikte < 4 cm	Bodem Fe:S > 1,0	Geen nalevering
slootbodemdichtheid > 0,52 kg/l	Bodem Fe:S > 1,0	Geen nalevering
Fe:P-ratio oppervlaktewater > 11 mg/l:mg/l	Bodemvocht Fe:P > 1,0	Geen nalevering
fosfor oppervlaktewater < 0.04 mg/l	Bodemvocht Fe:P > 1,0 & Bodem Fe:S > 1,0	Geen nalevering
fosfor oppervlaktewater > 0,47 mg/l	Bodemvocht Fe:P < 0,5 & Bodem Fe:S < 0,5	Nalevering

Tabel 3: Vuistregels voor de mogelijkheid op fosfornalevering.

Voor zover mogelijk zijn ook andere chemische eigenschappen op gelijke wijze geanalyseerd (op basis van zowel de bodem Fe:S-ratio als de bodemvocht Fe:P-ratio). Hieruit leidden wij de in tabel 3 getoonde vuistregels af omtrent de kans op fosfornalevering. Indien blijkt dat de kans op nalevering aanwezig is kan de bodemvocht fosforconcentratie met behulp van de correlatieformules meer inzicht geven in de hoogte van de geschatte nalevering.

Toepassing

Momenteel stelt HDSR voor alle afvoergebieden nutriëntenbalansen op, als onderbouwing van de volgende generatie KRW-maatregelen. De opgedane inzichten uit deze studie vormen hier een waardevolle bouwsteen voor. Met de vuistregels is in te schatten of er nalevering te verwachten is. Indien dit het geval is, geven de onderzoeksresultaten per deelgebied een gerichte indicatie van de omvang.



Afbeelding 5: Berekende fractiesommen fosfor in de Meijepolder in huidige situatie (5a, links) en na maatregelen (5b, rechts).

Ter illustratie toont afbeelding 5 een fractieberekening van bronnen in de Meijepolder. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van een fosforbalans op dagbasis. Het gehele watersysteem van de polder is daarbij geaggregeerd tot één volume, waarin instantane menging van alle inkomende posten optreedt. De Meijepolder is een veenweidepolder in het noordwesten van HDSR. In de polder komen deelgebied 1 (koopveen), deelgebied 2 (weideveen) en deelgebied 5 (klei) voor. Op basis van de oppervlakten van deze deelgebieden en de gemiddelde nalevering per deelgebied volgens de formule van Geurts is de gemiddelde nalevering in de Meijepolder geschat op 0,7 mg/m²/dag. Poelen e.a. (2012) heeft de temperatuursafhankelijkheid van de nalevering onderzocht door de nalevering in kolommen met slootbodemp en oppervlaktewater te meten bij 4 tot 25° C. Dit resulteerde in een lineaire functie voor de correctiefactor voor temperatuur, ten opzichte van 15° C. Hiermee is de nalevering over het gehele jaar geschat.

Andere bronnen zijn het inlaatwater, de drainage (af- en uitspoeling) en diverse diffuse bronnen zoals erfafspoeling en riooloverstorten (volledigheidshalve is ook neerslag afgebeeld, maar die bron is dermate klein dat hij niet te onderscheiden is in de grafieken). Kwel komt in deze polder niet voor. Afbeelding 5a toont de fosforfracties in de huidige

situatie in deze polder, uitgezet over een jaar. In de winter is drainage de grootste fractie, in de zomer het inlaatwater. Dit is niet verwonderlijk, aangezien doorspoeling 39% van de inkomende posten bedraagt op de waterbalans. De berekende nalevering uit de slootbodem bedraagt 7% van de fosforvrucht op jaarbasis. De fosforconcentratie van het oppervlaktewater in de zomer bedraagt gemiddeld 0,50 mg/l. Afbeelding 5b toont een hypothetische situatie zonder doorspoeling, zonder overige bronnen en een aanzienlijke reductie van de drainage. Het aandeel nalevering van de fosforvrucht op jaarbasis is in deze hypothetische situatie gestegen naar 29%. De zomergemiddelde fosforconcentratie bedraagt dan alsnog 0,32 mg/l. Grafisch is ook duidelijk te zien dat nalevering (de zwarte kleur) gedurende het gehele jaar een veel grotere rol speelt dan in de huidige situatie. Deze analyse maakt inzichtelijk in welke mate de fosforbelasting is te verbeteren. Dit inzicht is essentieel voor het bepalen van haalbare KRW-doelen. Zonder inzicht in de nalevering was dit onmogelijk geweest.

Discussie

De inzichten zijn een goede eerste stap richting een methodiek om de nalevering van fosfor uit de slootbodem vlakdekkend te kwantificeren. De huidige methodiek biedt nog ruimte voor verdere verbetering. De metingen zijn enkel verricht in maart. Het is dus de vraag in hoeverre de nalevering varieert per seizoen. De temperatuursafhankelijkheid van de nalevering is bijvoorbeeld enkel op kleine schaal onderzocht door Poelen e.a. (2012).

Ook de andere chemische eigenschappen kunnen sterk variëren over de seizoenen. Zeker de waarden voor het oppervlaktewater fluctueren aanzienlijk over de seizoenen, onder meer door veranderingen in temperatuur. Dit geldt echter minder voor de slootbodem. Daarom zijn de vuistregels rondom het oppervlaktewater veel minder robuust dan rondom de andere slooteigenschappen. Om een representatiever beeld van de waterkwaliteit te krijgen, wordt daarom aangeraden om ook bodemonsters te analyseren en niet enkel oppervlaktewatermonsters. Vooral het organischestofgehalte, wat vrij gemakkelijk en goedkoop kan worden bepaald, geeft voor het onderzochte gebied veel inzicht in de kans op fosfornalevering. Naast meer inzicht in de nalevering tijdens andere seizoenen, is de kwantificering van de nalevering in het stedelijk gebied wenselijk.

Verder verdienen de correlatieformules ook nader onderzoek, om een bredere empirische basis te verkrijgen. Zo bevat de correlatieformule van Poelen e.a. (2012) voor bodemvocht-fosforconcentraties tussen de 10 en 100 $\mu\text{mol/l}$ nog veel onzekerheden. Hierin vallen juist de meeste locaties die zijn onderzocht in dit gebied. Daarnaast verdient de aanname dat nalevering niet optreedt bij een Fe:P-ratio groter dan 1,0 mol/mol nader onderzoek. Dergelijke hoge ratio's komen binnen HDSR vooral voor in klei- en zandgebieden. De vraag is in hoeverre de daardoor veronderstelde geringe omvang van nalevering in die gebieden terecht is.

Daarnaast zorgt het extrapoleren van de gegevens van de locaties naar het gehele deelgebied voor extra onzekerheden. Zeker omdat de sloten in de deelgebieden onderling sterk varieerden in meetwaarden. Doordat de monsterlocaties zijn geselecteerd met een

kanssteekproef is veel van deze variatie meegenomen in de berekeningen en levert dit onderzoek toch goede eerste schattingen op van de gemiddelde nalevering in de landelijke sloten in het beheergebied. De resultaten zijn ook te extrapoleren naar soortgelijke gebieden buiten het beheergebied. Voorafgaand van deze extrapolatie is wel een goede vergelijking tussen de gebieden nodig. Er zijn namelijk, naast bodemtype, landgebruik en geohydrologie, ook andere factoren die mogelijk invloed kunnen hebben op de uiteindelijke nalevering, zoals bijvoorbeeld de verhouding zoet en zout grondwater.

Ten slotte moet bij de toepassing van de resultaten in gedachten worden gehouden dat de gevonden relaties enkel betrekking hebben op nalevering onder zuurstofrijke omstandigheden. Daarnaast kan nalevering ook plaats vinden onder zuurstofarme omstandigheden. Onder die omstandigheden kan een groot deel van het aan ijzer-gebonden fosfor vrijkomen, wat aanleiding kan geven tot sterk verhoogde fosforconcentraties. De Fe:P-ratio is dan ook niet meer sturend omdat ijzer en fosfor beiden vrijkomen en diffunderen naar de waterlaag. Omdat zuurstofloosheid in ondiepe wateren onregelmatig kan optreden (bijvoorbeeld 's nachts), kan fosfornalevering pulsgewijs optreden. Dit kan leiden tot de ontwikkeling van een kroosdek waarna de waterlaag zuurstofloos blijft. Het zuurstofgehalte van het water, dat weer afhankelijk is van de zuurstofconsumptie in de slootbodems, is dus ook een belangrijke variabele voor de chemische processen in sloten (Boedeltje e.a., 2005). Meer inzicht in deze nalevering onder zuurstofarme condities is erg van belang, zeker aangezien deze vorm van nalevering groter kan zijn dan de nalevering onder zuurstofrijke omstandigheden (Poelen e.a., 2012; Van Gerven e.a., 2011). Dit geldt dus juist voor gebieden die rijk aan ijzer zijn, zoals de kleigebieden.

Conclusies

Ondanks alle onzekerheden en mogelijke verbeteringen heeft dit onderzoek veel kennis opgeleverd om de bijdrage van de fosfornalevering te kwantificeren in het landelijke beheergebied van het waterschap. De geschatte gemiddelde nalevering in het beheergebied van HDSR varieert tussen de 0,0 en 2,0 mg P/m²/dag, waarbij lage nalevering wordt voorspeld in het klei- en zandgebied en hoge nalevering in de veengebieden. De gebruikte methode was pragmatisch en de unieke steekproef behelsde een divers scala aan sloten: van klein tot groot, tussen weiden en boomgaarden en met zowel kwel als wegzijging. De resultaten betekenen een duidelijke verbetering van de mogelijkheden om fosforbalansen op te stellen. Daardoor is de aanstaande generatie KRW-maatregelen aanzienlijk beter te onderbouwen.

Referenties

- Boedeltje, G., A.J.P. Smolders, L.P.M. Lamers en J.G.M. Roelofs** (2005) Interactions between sediment propagule banks and sediment nutrient fluxes explain floating plant dominance in stagnant shallow waters; in: Archiv für Hydrobiologie, vol 162, pag 349-362
- De Gruijter, J., D. Brus, M. Bierkens en M. Knotters** (2006) Sampling for natural resource monitoring; Springer, Berlin
- De Vocht, A.** (2008) Basishandboek SPSS 16; statistiek met SPSS 16, Bijleveld press, Utrecht
- Geurts, J.J.M., A.J.P. Smolders, A.M. Banach, J.P.M. van de Graaf, J.G.M. Roelofs en L.P.M. Lamers** (2010) The interaction between decomposition, N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens; in: Water Research, vol 44, pag 3487-3495
- Van de Kamp, R. en C. Blom** (2011) Jaarverslag oppervlaktewater 2010: Waterkwaliteit, chemie en ecologie; Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Houten
- Poelen, M.D.M., L.J.L van den Berg, G.N.J. ter Heerdt, R. Bakkum, A.J.P Smolders, N.G. Jaarsma, R.J. Brederveld en L.P.M. Lamers** (2012) Water-BODEMbeheer in Nederland: Maatregelen Baggeren en Nutriënten (BAGGERNUT) - Metingen Interne Nutriëntenmobilisatie en Decompositie (MIND), Eindrapportage 2012; B-WARE Research Center, Nijmegen
- Smolders, A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen, G. van der Velde en J.G.M. Roelofs** (2006) Internal eutrophication: 'How it works and what to do about it', a review; in: Chemistry and Ecology, vol 22, pag 93-111
- Smolders, A.J.P., T van den Broek, E.C.H.E.T. Lucassen, M. van der Welle en W. Zaadnoordijk** (2011) Monitoring proefsloten Lopikerwaard; Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, Houten
- Smolders, A.J.P., J. Loermans en L. Lamers** (2012) Effecten van flexibel peilbeheer op bodemprocessen en waterkwaliteit; Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen
- Van Gerven, L.P.A., R.F.A. Hendriks, J. Harmsen, V. Beumer en P.W. Bogaart** (2011) Nalevering van fosfor naar het oppervlaktewater vanuit de waterbodem: Metingen in een veengebied in de Krimpenerwaard; Alterra, Wageningen

