



**van hall
larenstein**
university of applied sciences

Datum 17 september 2021
Auteur Jasper van Belle
Versie 1.1 (eindversie)

Natte teelt voor waterkwaliteit

Verkenning van de bijdrage van paludicultuur aan
waterkwaliteitsverbetering in een Friese polder



Inhoud

1. Inleiding	3
Aanleiding	3
Achtergronden	3
Doel van het project	4
Onderzoeksvragen	5
Producten	5
Aanpak en leeswijzer	5
2. Nutriëntenemissies uit agrarische percelen	7
Achtergronden en methoden	7
Berekende emissies in de zes polders	7
3. Modelleren van N en P verwijdering in moerassen	10
Stikstofkringloop	10
Fosforkringloop	11
Modelconcept	11
Berekening van N- en P-verwijdering via biomassa	11
Berekening van N-verwijdering via microbiële omzetting	12
Berekening van N- en P-verwijdering door sedimentatie	12
4. Inschatting van nutriëntenverwijdering	16
Nutriëntenverwijdering uit diffuse bronnen	16
Nutriëntenverwijdering uit puntbronnen	19
Nutriëntenverwijdering in zuiverende maalkommen	21
5. Effecten op biodiversiteit	23
Welke soorten?	23
Beheer voor soorten	24
Beheer voor zuivering	24
6. Conclusie	25
Beperkingen van deze studie	25
N en P uit landbouwpercelen	26
N- en P-verwijdering in perceelranden en sloten	26



N- en P-verwijdering uit puntbronnen	26
N- en P-verwijdering bij zuiverende maalkommen	27
Wat kunnen zuiveringsmoerassen bijdragen aan vermindering van nutriëntenemissies uit landbouwpolders?	27
Wat draag dit bij aan behoud van biodiversiteit?	27
Toepassing in planvorming	28
7. Aanbevelingen	29
9. Bibliografie	31



1. Inleiding

Inleiding

Uitspoeling van nutriënten uit landbouwpolders heeft een negatieve invloed op de waterkwaliteit in de Friese boezem. Deze diffuse bron levert een aanzienlijk deel van de nutriëntenbelasting op de Friese boezem. Mede hierdoor heeft Wetterskip Fryslân grote moeite de door haar gestelde doelen voor de Kaderrichtlijn Water te realiseren. Dit rapport beschrijft de uitkomsten van een theoretische verkenning van de (on)mogelijkheid om deze nutriëntenstroom af te vangen in zuiverende moerassen. Voor deze moerassen gaan we uit van gewassen die ook interessant zijn voor hun biomassaproductie, zodat de nutriënten na te zijn omgezet in biomassa weer terug kunnen worden gebracht in de agrarische productieketen, of als apart product kunnen worden vermarkt.

Aanleiding

Op veel plekken in Fryslân is het een hele uitdaging om KRW doelen voor waterkwaliteit te halen. De oorzaak hiervoor ligt voor een groot deel in de relatief hoge nutriëntenbelasting op het Friese watersysteem, met name vanuit de landbouw en RWZI's (Ros & Verweij, 2019). Natte teelten, zoals de teelt van lisdodde of riet, kunnen als zuiveringsmoerassen een bijdrage leveren aan het verminderen van deze belasting. In het moeras worden nutriënten omgezet in biomassa, waardoor deze uit het water worden verwijderd (Geurts, Fritz, Lamers, Grootjans, & Joosten, 2017). Als deze biomassa wordt geoogst kan ze een bijdrage leveren aan de opbouw van een circulaire economie, indien economisch waardevolle biomassa geteeld kan worden. Een alternatief is om de biomassa als compost of veevoer terug te brengen in de agrarische bedrijfsvoering, waardoor de nutriëntenkringloop in het bedrijf wordt versterkt.

Achtergronden

Voor het voldoen aan de KRW-normen zijn de nutriëntengehalten in de Friese boezem relevant, aangezien de vaarten en plassen van de boezem zijn opgenomen in de KRW en poldersloten niet. Poldergemalen fungeren hierbij als puntbronnen die de nutriënten uit het achterliggende poldergebied uitslaan op de boezem. In de polder kent de nutriëntentoevoer naar het oppervlaktewater puntbronnen, zoals boerenerven en RWZI's, en diffuse toevoer vanuit landbouwgronden. Voor zowel puntbronnen als diffuse bronnen lijken zuiveringsmoerassen toepasbaar, maar de bijdrage aan nutriëntenreductie zal afhangen van de inrichting en nutriëntenbelasting. Het kwantificeren van de zuiverende werking van inrichtingsvarianten voor verschillende plaatsen in de polder maakt duidelijk hoe groot de bijdrage aan realisatie van KRW-doelen kan zijn en hoe groot de zuiverende moerassen daarvoor moeten zijn. Deze kwantificering helpt het waterschap bij haar planvorming, maar kan ook de opmaat vormen tot vergoeding van de eigenaar voor deze 'blauwe dienst'. In de meeste gevallen zal de eigenaar een agrariër zijn.

In het concept van zuiverende moerassen vormt de oogst van biomassa een belangrijke afvoerpost van nutriënten en is dus cruciaal voor de zuiveringsfunctie. In deze studie kijken we vooral naar de inzet van gewassen die ook worden ingezet voor biomassaproductie in natte teelten en paldicultuur, zodat de zuiveringsmoerassen bruikbare en/of economisch waardevolle biomassa produceren. Zodoende wordt de zuiveringsfunctie niet enkel een kostenpost, maar krijgt ze ook waarde.

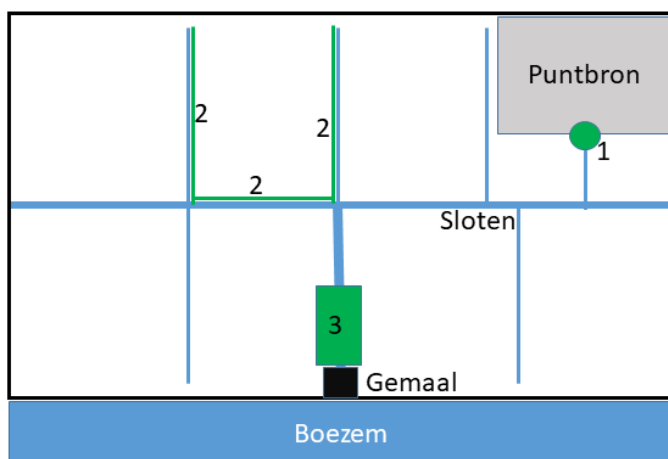
Zuiveringsmoerassen kunnen bovendien een bijdrage leveren aan het behoud van biodiversiteit. Enerzijds doordat waterzuivering de milieudruk op natuurgebieden vermindert, wat de habitatkwaliteit in natuurgebieden verbetert, maar ook doordat de moerassen zelf leef-, voortplantings- of opgroeigebied kunnen vormen voor planten en dieren. Het oogsten van biomassa kan de habitatfunctie van zuiveringsmoerassen echter negatief beïnvloeden.

Inzet van natte teelt voor vermindering van de nutriëntenbelasting van oppervlaktewater lijkt dus kansen te bieden voor verbeterde KRW-scores, bijdrage aan (agrarische) bedrijfsmodellen en behoud van biodiversiteit. Maar voor al deze functies is aandacht nodig voor de inrichting en het beheer in relatie tot de plaats in het landschap, en om alle functies te bedienen zal gezocht moeten worden naar optimalisatie.

Doel van het project

Doel van dit project is om de haalbaarheid van inzet van natte teeltgewassen voor verbetering van waterkwaliteit te duiden en een eerste inschatting van de bijdrage aan biodiversiteit te geven. Op voorhand lijken er verschillende mogelijkheden te bestaan om natte teelten in te zetten voor waterkwaliteitsbeheer. Deze drie opties corresponderen met drie plaatsen in een typische polder en zijn dus te beschouwen als zuiveringslocaties. De ligging van de zuiveringslocaties is schematisch weergegeven in figuur 1. Ze kunnen als volgt worden omschreven:

1. Nutriëntenverwijdering bij puntbronnen met verhoogde emissie, zoals RWZI's of IBA's, waar ze kunnen bijdragen aan de zuivering van afstromend water. Hier kan de belasting worden afgevangen alvorens de nutriënten in het slotensysteem terecht komen;
2. Nutriëntenverwijdering bij diffuse bronnen in de polders, langs of in bestaande sloten. Met behulp van zuiverende randen kan belasting uit de percelen worden afgevangen;
3. Nutriëntenverwijdering aan het einde van de polder, dus waar de poldersloten samen komen. Met behulp van een zuiveringsmoeras kunnen nutriënten worden verwijderd voordat het gemaal het water uitslaat op de boezem.



Figuur 1. Schematische weergave van drie zuiveringslocaties in een polder.



Onderzoeksvragen

De volgende vragen staan centraal:

1. Welke vrachten nutriënten komen vrij, en hoe variëren deze in de tijd, bij:
 - a. landbouwpercelen, en hoe varieert dit in de provincie?
 - b. landbouwpolders / waterbeheersingseenheden?
2. Welke mate van waterkwaliteitsverbetering is realistisch te verwachten?
 - a. Hoe wordt dit beïnvloed door de inrichting?
 - b. Hoe verschilt dit in de tijd?
 - c. Hoe verschilt dit tussen de gewassen die in aanmerking komen voor natte teelten?
3. Welke gunstige effecten kunnen natte teelten hebben voor het behoud van biodiversiteit, en hoe varieert dit tussen de gewassen?

Producten

In dit project is naast dit rapport ook een model ontwikkeld, en zijn twee aanvullende rapportages opgesteld, respectievelijk door WENR en Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek. De resultaten van dit project zijn te downloaden vanaf de website <https://betterwetter.nl>.

Aanpak en leeswijzer

Deze studie gaat uit van 6 polders waarvoor in eerdere projecten al veel kennis is vergaard over de nutriëntenemissies naar het oppervlaktewater. Voor deze polders zijn de emissies naar het oppervlaktewater berekend door Wageningen Environmental Research (van Gerven & van Boekel, 2020). Vervolgens wordt voor één van deze polders modelmatig verkend hoeveel van deze nutriënten verwijderd kunnen worden in moerassen, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de zomer en de winter. Tenslotte wordt op basis van Mettrop (2021) aangegeven hoe verschillende soortgroepen kunnen profiteren van de aanleg van zuiverende moerassen.

Hoofdstuk 2 beschrijft de nutriëntenemissies in de zes polders. Hoofdstuk 3 beschrijft op hoofdlijnen de omzettingen van nutriënten in moerassen, en vertaalt dit naar een modelconcept voor nutriëntenverwijdering. Hoofdstuk 4 beschrijft hoeveel stikstof- en fosforverwijdering met zuiveringsmoerassen berekend wordt voor elk van de zuiveringslocaties uit figuur 1. Hoofdstuk 5 beschrijft de hoofdlijnen van een literatuurstudie naar de bijdrage van beheerde, productieve moerassen aan biodiversiteit. In hoofdstuk 6 worden de conclusies geformuleerd, en het rapport wordt afgesloten met een set aanbevelingen in hoofdstuk 7.

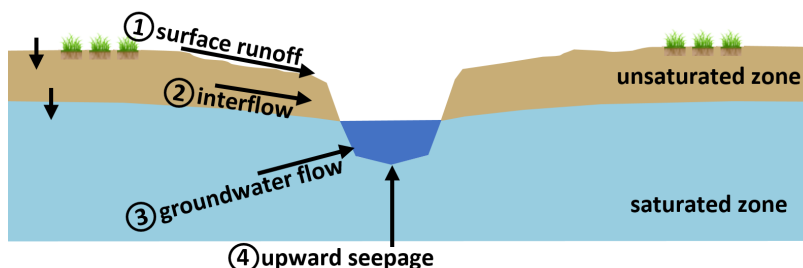


2. Nutriëntenemissies uit agrarische percelen

Achtergronden en methoden

Voor deze studie gaan we uit van zes polders waarover in diverse projecten al veel kennis is gegenereerd over de emissies vanuit percelen naar het oppervlaktewater. Van deze polders liggen er twee op klei, twee op zand en twee op veen (figuur 3). In de eerdere projecten zijn nutriëntenemissies berekend door Wageningen Environmental Research (van Boekel, Groenendijk, & Renaud, 2016; van Boekel, Groenendijk, & Renaud, 2017). De berekeningen van nutriëntenemissies zijn gebaseerd op het landelijke emissiemodel STONE (Wolf, et al., 2003). STONE berekent uit- en afspoeling van nutriënten op basis van gegevens over de opbouw van de ondergrond, bodemtype, bemesting, weergegevens en kwel/infiltratie. Dit landelijke model is gekalibreerd en gevalideerd op regionale schaal voor van Boekel *et al.* (2016).

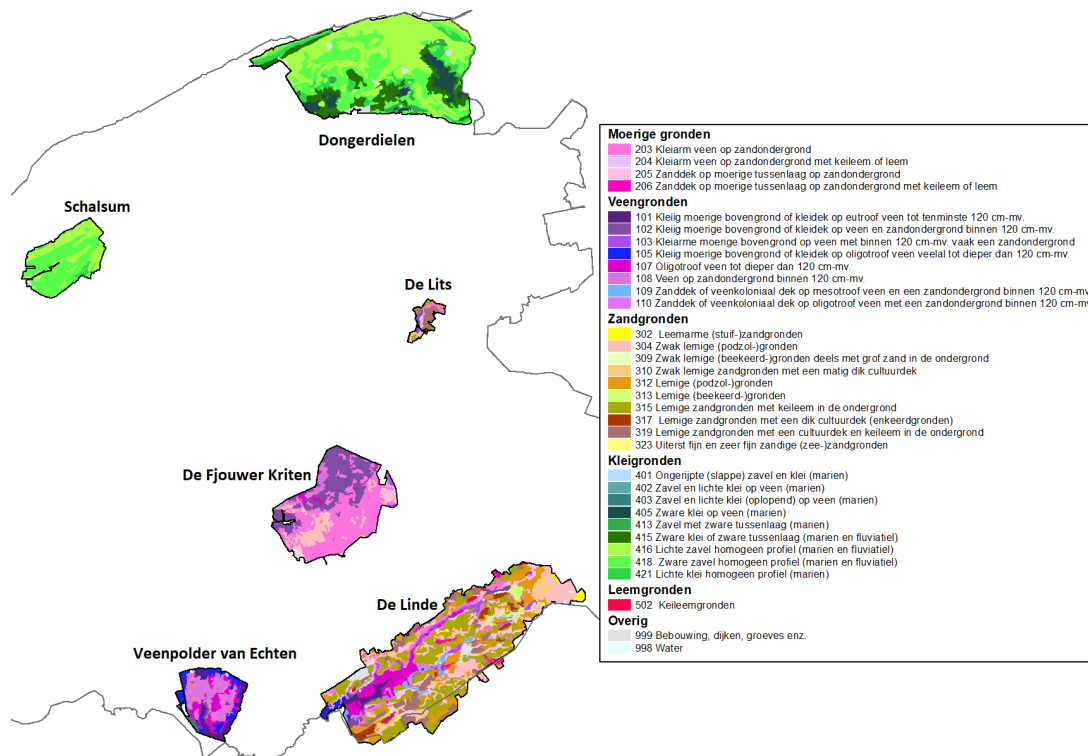
Voor de hier beschreven studie is het modelresultaat seizoensafhankelijk beschikbaar gemaakt, waarbij als zomerperiode wordt uitgegaan van april t/m september. Vervolgens is de nutriëntenemissie uitgesplitst naar een ondiepe en een diepe route. Hierbij bestaat de ondiepe route uit afspoeling plus stroming door de onverzadigde bodem, terwijl de diepe route bestaat uit grondwaterstroming door de verzadigde bodem en kwel (figuur 2). De berekening van de ondiepe route is afgestemd op voortschrijdend modelleerinzicht, door de STONE-resultaten te herschalen op basis van de aanpak in het Nationaal Water Model (NWM). De NWM-methode berekent langjarig gemiddelde ondiepe uit- en afspoeling op basis van perceelkenmerken. Het resultaat hiervan is jaar- en seizoensafhankelijk gemaakt door de met STONE berekende ondiepe uit- en afspoeling te herschalen op basis van de verhouding tussen langjarig gemiddelde STONE-resultaten en de NWM-methode (van Gerven & van Boekel, 2020).



Figuur 2. De onderscheiden ondiepe en diepe routes van nutriënten uit- en afspoeling. De ondiepe route combineert afspoeling (nr. 1 in de figuur) en onverzadigde grondwaterstroming (nr. 2). De diepe route combineert verzadigde grondwaterstroming (nr. 3) en kwel (nr. 4) (van Gerven & van Boekel, 2020).

Berekende emissies in de zes polders

Onderstaande informatie is overgenomen uit van Gerven & van Boekel (2020). In figuur 3 is de ligging van de polders weergegeven op de bodemkaart. De polders Dongerdielen en Schalsum liggen op kleibodems, op zand betreft het de polders De Lits en Linde, en op veen zijn emissies berekend voor de polders De Fjouwer Kriten en de Veenpolder van Echten.



Figuur 3. Bodemtypen in de zes behandelde polders (van Gerven & van Boekel, 2020; Heinen, Brouwer, Teuling, & Walvoort, 2021).

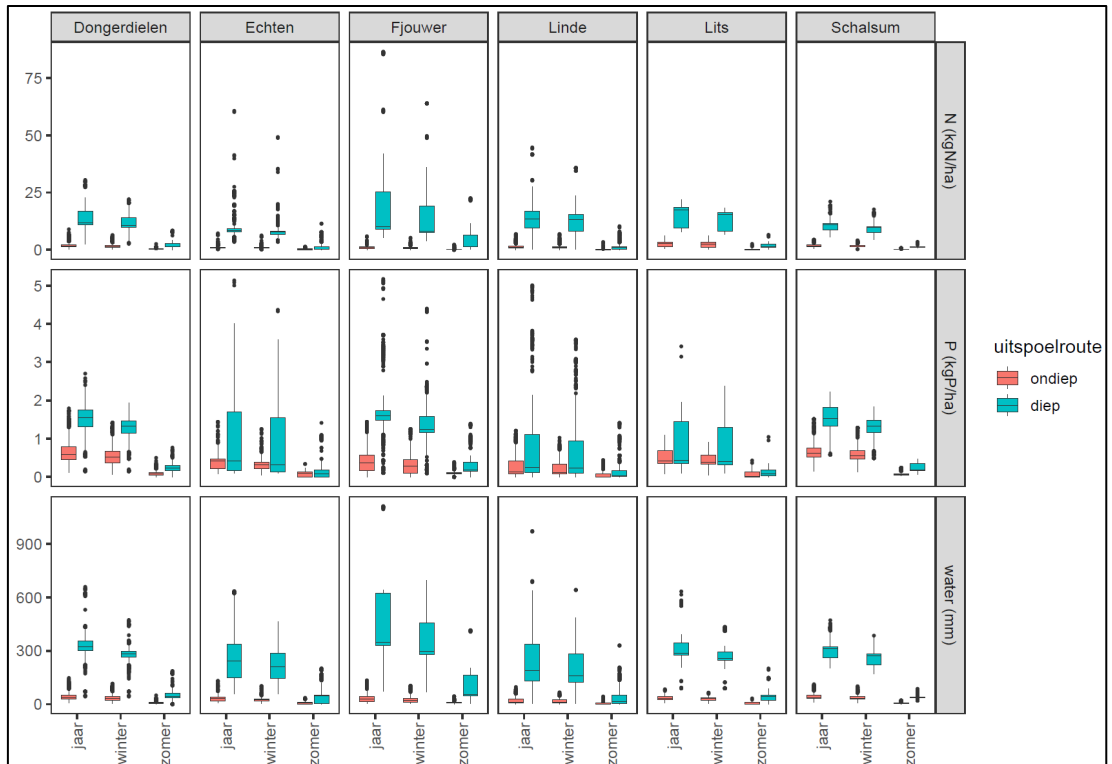
Voor het bepalen van de effectiviteit van het afvangen van diffuse nutriëntenstromen uit de percelen, is het relevant of percelen aan water grenzen of niet. In de klei- en veenpolders grenst 98 – 99% van de percelen aan water. In de zandpolders liggen deze percentages lager (72% in polder De Linde, resp. 92% polder De Lits). Alleen in De Linde leidt dit tot noemenswaardige verschillen: percelen grenzend aan water dragen ca. 2% meer dan gemiddeld bij aan de N-emissie en ca. 12,5% meer dan gemiddeld aan P-emissie.

Tabel 1. Per polder gemiddelde uit- en afspoeling uit landbouwpercelen over de periode 2010 – 2017, voor alle percelen in de polder en enkel voor percelen die grenzen aan water (van Gerven & van Boekel, 2020).

Polder	Landbouwareaal (ha)	Landbouwareaal aan water (%)	N (kg N/ha/jaar)		P (kg P/ha/jaar)	
			totaal	water	totaal	water
Dongerdielen	11.056	98	15.5	15.5	2.1	2.1
Echten	2.326	99	11.4	11.4	1.5	1.5
Fjouwer	4.581	99	19.1	19.1	2.0	2.0
Linde	10.126	72	14.7	15.0	0.8	0.9
Lits	476	92	17.7	17.6	1.5	1.5
Schalsum	2.562	98	12.2	12.2	2.3	2.3



Op jaarbasis en gemiddeld per polder draagt ondiepe uit- en afspoeling 5 – 14% bij aan de N-emissie, en 18 – 23% aan P-emissie. In polder De Lits draagt ondiepe uit- en afspoeling het meest bij aan de N- en P-emissies. De variatie in zowel ondiepe als diepe uit- en afspoeling varieert sterk tussen jaren: jaargemiddelde waarden per polder kennen een standaarddeviatie van ca. 50% van de gemiddelde waarde over 2010 – 2017. Figuur 4 laat zien hoe de berekende uit- en afspoeling van water, stikstof en fosfor varieert tussen percelen, polders, jaren en seizoenen.

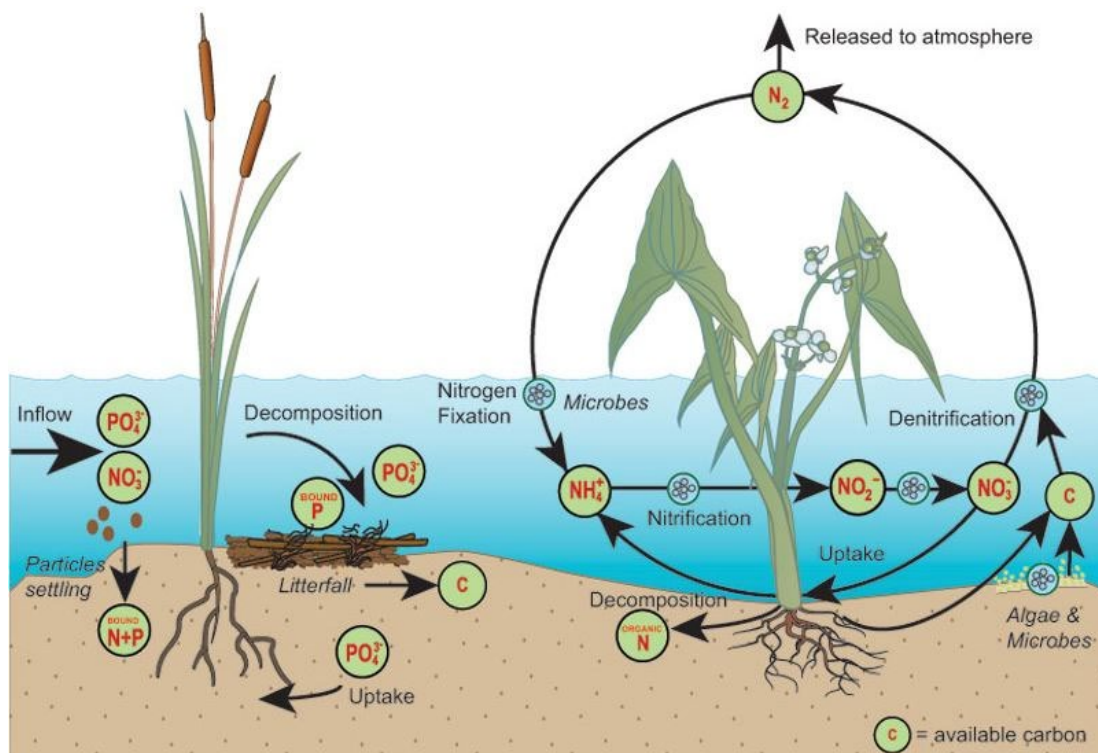


Figuur 4. Variatie in uit- en afspoeling van water, N en P, per perceel en per polder, uitgesplitst naar winter- en zomerhalfjaar, en naar de diepe- en ondiepe routes (van Gerven & van Boekel, 2020).

3. Modelling van N en P verwijdering in moerassen

Stikstofkringloop

De belangrijkste processen voor verwijdering van stikstof (N) uit water zijn weergegeven in figuur 5. Planten nemen nitraat (NO_3^-) en ammonium (NH_4^+) en bouwen hiermee biomassa op, dit is de assimilatie van organische stof. In aanwezigheid van zuurstof wordt dood organisch materiaal door bacteriën afgebroken, waarbij ammonium ontstaat. Dit is de ammonificatie. In aanwezigheid van zuurstof wordt ammonium omgezet naar nitriet (NO_2^-) en vervolgens naar nitraat. Dit is de nitrificatie. Bij afwezigheid van zuurstof, of als de toestroom van zuurstof geringer is dan de consumptie door ammonificatie en nitrificatie, wordt nitraat gebruikt als elektronenacceptor. Hierbij wordt nitraat omgevormd tot stikstofgas (N_2), dat als gas naar de atmosfeer ontsnapt. Tenslotte kan stikstof in en aan onopgeloste delen door sedimentatie uit de waterkolom verdwijnen. Verwijdering van stikstof uit het oppervlaktewater is dus het gevolg van zowel opname door vaatplanten, als omzetting naar stikstofgas door bacteriën, als sedimentatie.



Figuur 5. Vereenvoudigde weergave van fosfor- en stikstof-omzettingen in moerassen (bron (Kostel, 2021), aangepast naar (Kadlec & Knight, 1996). Van links naar rechts is weergegeven: sedimentatie van onopgeloste bestanddelen (particles settling), omzettingen van fosfor, en omzettingen van stikstof.



Fosforkringloop

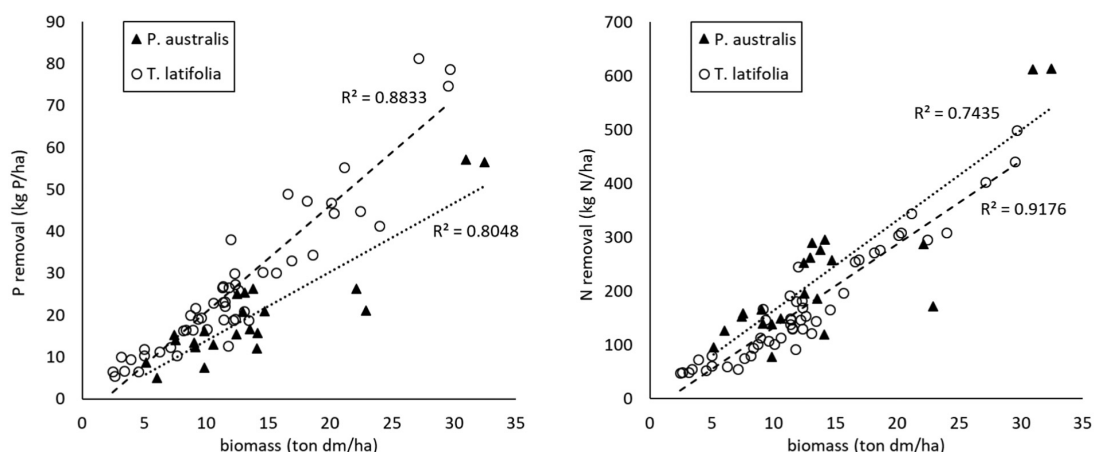
De fosforkringloop is relatief eenvoudig, doordat omzettingen door bacteriën geen rol spelen in de verwijdering uit water (figuur 5). Fosfor (P) kent geen gasvorm, zodat verwijdering alleen mogelijk is door opname in biomassa van planten (= assimilatie) of door sedimentatie met onopgeloste bestanddelen. Planten nemen fosfor op als opgelost ortho-fosfaat (ortho-PO_4^{3-}). Bij afbraak van dood organisch materiaal door bacteriën komt het fosfor weer in oplossing als ortho-fosfaat.

Modelconcept

Voor berekening van N- en P-verwijdering uit het water beschouwen we drie verschillende aspecten: verwijdering van N door bacteriële omzettingsprocessen, verwijdering van N en P door assimilatie in biomassa, en verwijdering van N en P door sedimentatie. Naast verwijdering door deze processen kan in moerassen ook N en P worden toegevoegd aan de waterkolom, door nalevering uit de bodem, of door afbraak van organisch materiaal. Nalevering uit de bodem is niet opgenomen in het model, omdat dit sterk afhankelijk is van lokale bodemcondities. Verder gaat het modelconcept uit van het oogsten van plantenbiomassa om daarmee nutriënten te verwijderen, zodat afbraak van organisch materiaal geen grote rol speelt.

Berekening van N- en P-verwijdering via biomassa

De hoeveelheid N- en P-verwijdering door biomassaapductie staat gelijk aan de hoeveelheid N en P in geoogste biomassa. Dit is afhankelijk van de productiviteit en het nutriëntengehalte in biomassa. De belangrijkste soorten voor paludicultuur, dus voor productie van nuttige biomassa in (zuiverende) moerassen zijn lisdodde (*Typha* spp.) en riet (*Phragmites communis*) (Deelexpeditie Natte Teelten, 2019). De nutriëntenverwijdering door biomassa-oogst van deze soorten is beschreven door Geurts *et al.* (2020), zie figuur 6. De regressievergelijkingen zijn door de auteurs beschikbaar gesteld voor dit onderzoek; deze zijn toepasbaar bij gewasproductie 4 – 25 ton ds/ha/jaar. Op basis van paludicultuur-proeven in Nederland lijkt een gewasproductie van ca. 10 – 15 ton ds/ha/jaar reëel in voedselrijk oppervlaktewater.



Figuur 6. P-verwijdering (links) en N-verwijdering (rechts) door oogst van biomassa van Riet (*P. australis*) en Grote lisdodde (*T. latifolia*) (Geurts, *et al.*, 2020).

De nutriëntenexport door oogst van ondergedoken waterplanten is ingeschat op basis van gepubliceerde metingen aan biomassaproductie van drijvende en ondergedoken waterplanten (van Zuidam, 2013) en nutriëntengehalten van Smalle waterpest (*Elodea nuttallii*) (Escobar, Voyevoda, Fühner, & Zehnsdorf, 2011). De gewasproductie van ondergedoken en drijvende waterplanten lijkt geringer dan die van Riet en lisdodden: te weten een ordegrootte van 1,5 ton ds/ha/jaar, dit bestaat voor 2,8% uit N en 0,4% P.

Berekening van N-verwijdering via microbiële omzetting

Verwijdering van stikstof vindt plaats via twee samenhangende processen: nitrificatie van ammonium en denitrificatie van nitraat. Uitgaande van het Handboek stikstofverwijdering (STOWA, 1993) verlopen beide processen goed een pH rond 7,5. In Friese sloten is een vergelijkbare pH te verwachten, zodat de pH niet beperkend is. De snelheid van nitrificatie en denitrificatie is in open moerassen vooral afhankelijk van de temperatuur. Dit berekenen we door uit te gaan van een gemiddelde denitrificatiesnelheid waarop we een temperatuurcorrectiefactor toepassen.

Voor de gemiddelde denitrificatiesnelheid gaan we uit van een recente vergelijking van effectiviteit van zuiveringsmoerassen (Land, et al., 2016). De mediane totaal-N verwijdering is 930 kg/ha/jaar ($n = 112$, gem. = 181, SE 251). Land *et al.* geven geen informatie over de vegetatie in de onderzochte zuiveringsmoerassen. Aannemend dat de meeste met Riet (*Phragmites communis*) begroeid zijn met een productiviteit van 10 ton ds/ha/jaar, verwijdert dit door assimilatie 164 kg N/ha/jaar. Deze aanname wordt onderbouwd doordat deze vegetatie ca. 14 kg P/ha/jaar assimileert, wat redelijk overeenkomt met de door Land *et al.* gemelde mediane P-verwijdering van 12 kg P/ha/jaar. De mediane microbiële N-verwijdering is dan $930 - 164 = 766$ kg N/ha/jaar, oftewel 2,10 kg N/ha/dag. Uitgaande van de temperatuurafhankelijkheid volgens het Handboek stikstofverwijdering, levert dit als N-verwijdering op

$$R_{Nmicro} = 2,10 * 1,103^{(t-15)} \quad \text{(functie 1)}$$

Waarin R_{Nmicro} is de potentiële microbiële N-verwijdering in kg N/ha/dag en t is de temperatuur in °C.

Berekening van N- en P-verwijdering door sedimentatie

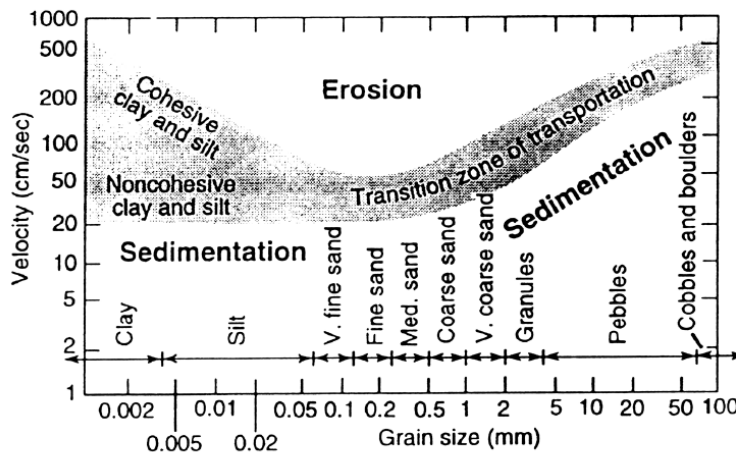
De bijdrage van sedimentatie aan nutriëntenverwijdering wordt berekend door te bepalen of sedimentatie optreedt en indien dat het geval is te schatten hoeveel zwevend stof sedimenteert.

Voor sloten gaat de berekening er van uit dat sedimentatie afhankelijk is van de stroomsnelheid. Figuur 7 geeft een algemene, grove relatie tussen diameter van het zwevend stof, stroomsnelheid en sedimentatie vs. sedimentatie (Olin, Fischenich, Palermo, & Hayes, 2000). In Friese sloten zal het in de praktijk vooral gaan om zwevende organische delen, dat is de categorie 'silt' in figuur 7. Om dit te laten sedimenteren moet de stroomsnelheid lager zijn dan 20 cm/s. Om te controleren of hieraan wordt voldaan wordt de stroomsnelheid ingeschat op basis van de Formule van Manning

$$Q = \frac{A * R^{2/3} * I^{1/2}}{n} \quad \text{(functie 2)}$$



Waarbij Q is debiet in m^3/s , A is de natte doorsnede in m^2 , R is de hydraulische straal in m , I is het verhang in m/m , en n is de coëfficiënt van Manning in $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ (Bot, 2016). De coëfficiënt van Manning is een ruwheidscoëfficiënt. De waarden die hiervoor ingevoerd kunnen worden staan in tabel 2.



Figuur 7. Een vereenvoudigde relatie tussen korrelgrootte, stroomsnelheid en sedimentatie vs. erosie (Olin, Fischenich, Palermo, & Hayes, 2000).

Tabel 2. Ruwheidsfactoren die in het model ingevoerd kunnen worden (uit Bot, 2016).

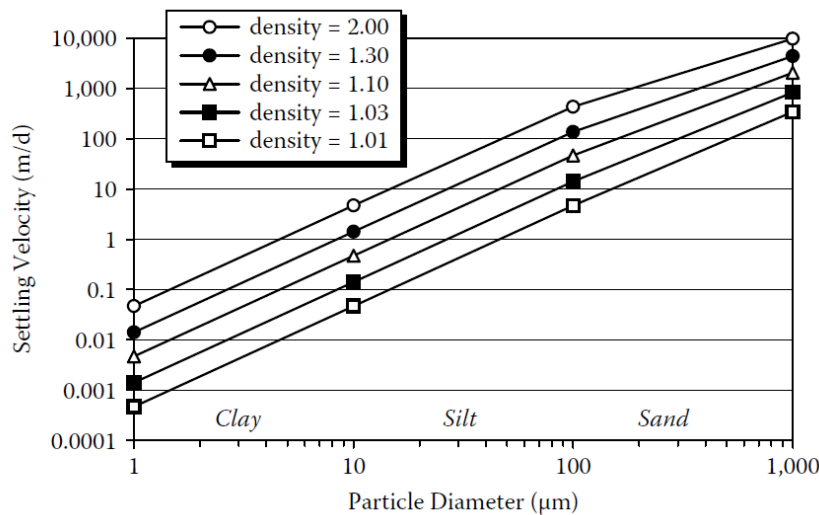
Type watergang & begroeiing	Manning's n ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$)
Schone rechte waterloop	0,03
Waterloop met intensieve begroeiing	0,15
Dichtgegroeide natuurlijk waterloop in de zomer	0,25

De stroomsnelheid v in m/s is dan

$$v = Q/A$$

(functie 3)

Voor vlakvormige zuiveringsmoerassen gaat de berekening er van uit dat sedimentatie optreedt als de verblijftijd van het water in het moeras hoger is dan de theoretisch benodigde tijd voor sedimentatie. De sedimentatiesnelheid is afhankelijk van de grootte en het gewicht van het zwevend stof, zie figuur 8. In het model moet daarom een specifieke sedimentatiesnelheid voor de gemodelleerde situatie worden ingevoerd. In experimenten met zuiverende moerassen langs de monding van de Hunze (Mouissie, van Belle, van Diggelen, & Knol, 2008), werd een sedimentatiesnelheid $W_s = 0,24 \text{ m}/\text{dag}$ werd gevonden, voor sediment dat voor een aanzienlijk uit organisch materiaal bestond. In de modellering gaan we uit van een iets conservatiever ingeschatte waarde van $0,2 \text{ m}/\text{dag}$.



Figuur 8. Sedimentatiesnelheid van bolvormige deeltjes in water bij 20°C, voor verschillende dichtheden (Kadlec & Wallace, 2009)

De sedimentatieflux dSS in mg SS/dag is dan

$$dSS = C_{SS} * V * W_s / z \quad (\text{functie 4})$$

Waar C_{SS} is de concentratie zwevend stof in mg/l, V is het watervolume in l, W_s is de specifieke sedimentatiesnelheid van het zwevend stof, en z is de waterdiepte in m.

De tijd die nodig is voor sedimentatie wordt bepaald door iteratief te berekenen hoeveel dagen nodig zijn om C_{SS} terug te brengen 0,05 mg/m² bodemoppervlak.

Indien sedimentatie optreedt wordt de bijdrage aan nutriëntenverwijdering ingeschat op basis van een *batch*-benadering, waarbij de volledige sedimentlast die op één moment aanwezig is in de waterkolom neerslaat in de tijd dat dit water in de sloten of in het zuiveringsmoeras aanwezig is. Hoe vaak dit optreedt is afhankelijk van de verhouding tussen de beschikbare tijd voor sedimentatie en de verblijftijd van het water, dus

$$dSS = V * C_{SS} * t_{\text{beschikbaar}} / \text{HRT} \quad (\text{functie 5})$$

waarbij dSS is de sedimentverwijdering in kg/seizoen, V is het volume van de sloten in de polder of van het zuiveringsmoeras in m³, C_{SS} is de concentratie onopgeloste bestanddelen in kg/m³, $t_{\text{beschikbaar}}$ is de tijd in dagen waarin sedimentatie kan optreden in, en HRT is de verblijftijd in dagen.

In vlakvormige zuiveringsmoerassen is de beschikbare tijd voor sedimentatie het volledige winter- of zomerseizoen, dus 183 dagen. Voor sloten moet het percentage van het seizoen waarin rustig weer optreedt worden ingevoerd, om rekening te houden met opwerveling van sediment door windwerking. Dit beperkt $t_{\text{beschikbaar}}$.

De verwijdering van stikstof (N) door sedimentatie is dan



$$R_{Nsed} = dSS * C_{NinSS}$$

(functie 6)

Waarin R_{Nsed} is de N-verwijdering door sedimentatie in kg/seizoen en C_{NinSS} is het N-gehalte van onopgeloste bestanddelen in kg/kg.

De verwijdering van P door sedimentatie is dan

$$R_{Psed} = dSS * C_{PinSS}$$

(functie 7)

Waarin C_{PinSS} is het P-gehalten van onopgeloste bestanddelen in kg/kg.

4. Inschatting van nutriëntenverwijdering

Nutriëntenverwijdering uit diffuse bronnen

Randenteelt voor interceptie van oppervlakkige stromen

Met een rand van invanggewassen kan oppervlakkige afstroming en ondiepe uitspoeling worden afgevangen. Figuur 9 en 10 illustreren de belasting met stikstof en fosfor van het oppervlaktewater in de Veepolder van Echten, en de hoeveelheid stikstof en fosfor die kan worden vastgelegd met randenteelt. Figuur 9 laat de resultaten zien voor een 1 m brede strook Riet, uitgaande van een productiviteit van 10 ton ds/ha/jaar. Figuur 10 laat de resultaten zien voor eenzelfde strook begroeid met Grote lisdodde, bij een productiviteit van 10 ton ds/ha/jaar. Opvallende resultaten zijn

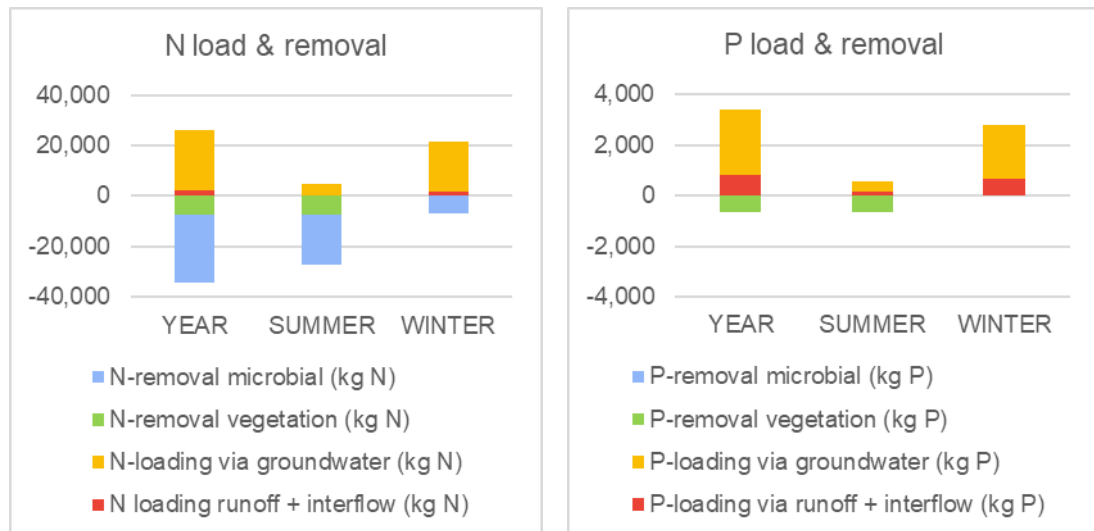
- De belasting met zowel N als P vooral in de winter plaatsvindt. Dit geldt niet alleen voor de Veepolder van Echten, maar ook voor de overige polders (zie hoofdstuk 2);
- De belasting via afspoeling en onverzadigde grondwaterstroming een relatief klein aandeel heeft. Dit geldt niet alleen voor de Veepolder van Echten, maar ook voor de overige polders (zie hoofdstuk 2);
- N vooral wordt verwijderd door microbiële omzetting. Merk overigens op dat de verwijdering van N niet hoger kan zijn dan de belasting; de figuren geven slechts de potentiële verwijdering weer;
- Verwijdering van de N-belasting veel beter haalbaar is dan verwijdering van de P-belasting. Dit is slechts ten dele het gevolg van de bijdrage van microbiële omzettingen;
- De P-verwijdering met biomassa van Grote lisdodde (figuur 10) is aanzienlijk groter dan die met Riet (figuur 9). Een 1 m brede strook lisdodde langs alle sloten in de Veepolder in Echten resulteert in ruim 950 kg P-verwijdering, wat meer is dan de 830 kg P-belasting via afspoeling en onverzadigde uitspoeling. De P-verwijdering met een 1 m brede strook Riet bedraagt een kleine 650 kg, voor een vergelijkbare verwijdering als met lisdodde is een 1,5 m brede strook nodig;
- Doordat de verwijdering van P het resultaat is van plantengroei vindt deze plaats in de zomer, maar de belasting treedt vooral op in de winter. Opname en af- en uitspoeling sluiten dus niet op elkaar aan.

De conclusie is dat het afvangen van N- en P-belasting uit afspoeling en ondiepe uitspoeling op jaarbasis gezien zeer haalbaar lijkt. Omdat P-verwijdering moeilijker is dan N-verwijdering, is de verwijderingspotentie voor P maatgevend. Lisdodde is daarom een betere kandidaat dan Riet, omdat het meer P opneemt. Maar doordat de ondiepe stromen slechts 18 – 23% aan de P-belasting bijdragen, kan niet meer dan dat aandeel worden verwijderd met invanggewassen.

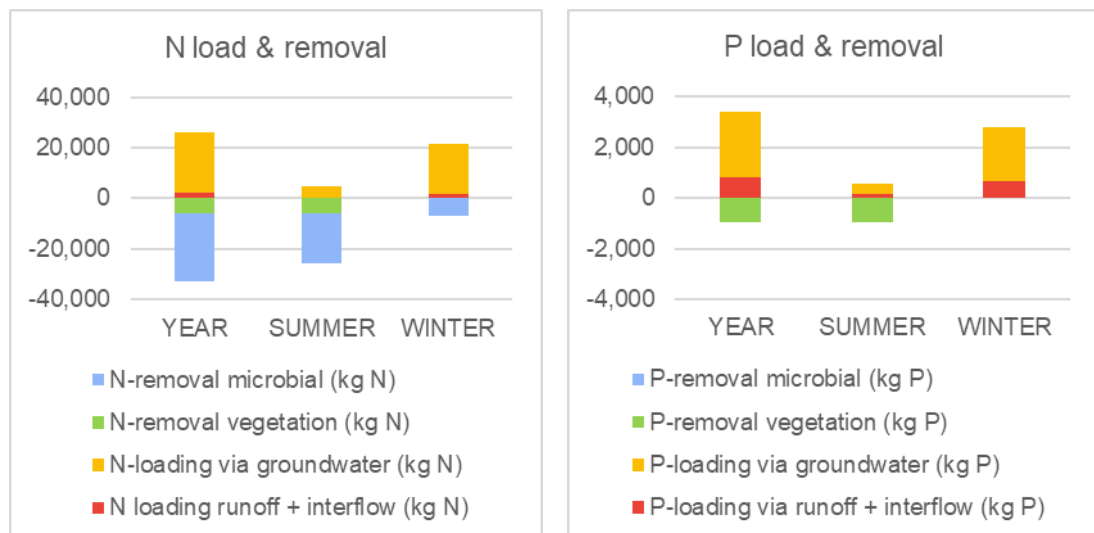
In theorie kunnen de sloten zelf gebruikt worden als zuiveringsmoeras, door ze geheel dicht te laten groeien met lisdodde. Op jaarbasis volstaat in de Veepolder van Echten hiervoor een gemiddelde breedte van het zuiveringsmoeras van 3,5 m. Dit lijkt een haalbare dimensionering, maar het laten dichtgroeien van sloten leidt tot problemen met het waterbeheer. Bovendien is



de grootste beperking van de inzet van zuiveringsmoerassen dat de vegetatie groeit in de zomer, terwijl de nutriëntenbelasting vooral in de winter optreedt.



Figuur 9. N- en P-belasting en potentiële verwijdering met een 1 m brede strook Riet als invanggewas langs de randen van percelen in polder Echten, uitgaande van een productiviteit van 10 ton ds/ha/jaar.



Figuur 10. N- en P-belasting en potentiële verwijdering met een 1 m brede strook Grote lisdodde als invanggewas langs de randen van percelen in polder Echten, uitgaande van een productiviteit van 10 ton ds/ha/jaar.

Sedimentatie in sloten voor verwijdering van winteremissies

De uitdaging voor effectieve inzet van zuiverende moerassen is om de nutriëntenemissie in de winter te verwijderen aangezien winteremissies de jaarbalans domineren. Sedimentatie kan hierin een rol spelen, aangezien dit niet gebonden is aan groeiprocessen. De potentiële bijdrage van sedimentatie is sterk afhankelijk van het gehalte zwevend stof in de waterkolom en de

hydraulische ruwheid (Manning's coëfficiënt n) en dimensionering van de sloten. De bijdrage van sedimentatie is ingeschat voor de Veenpolder van Echten, uitgaande van sloten van 2 m breedte aan het wateroppervlak, 0,5 m diepte, 1,5 m brede waterbodem, 0,02 m/m verhang en intensieve begroeiing (Manning's $n = 0,15$). Voor het zomerseizoen is aangenomen dat het weer 60% van de tijd voldoende rustig is voor sedimentatie, voor de winter is hiervoor 30% aangenomen. De hoeveelheid N en P in zwevend stof is afgeleid van meetgegevens van Wetterskip Fryslân, die zijn bepaald bij gemalen die het water uit de polder uitslaan naar de boezem. Alle beschikbare metingen voor veenpolders zijn gebruikt. Dit levert een bescheiden aantal van 9 metingen op: 7 monsters uit de Grote veenpolder (meetpunt 1719) en 2 monsters uit polder Harich Elahuizen (meetpunt 104). De gebruikte waarden staan in tabel 3.

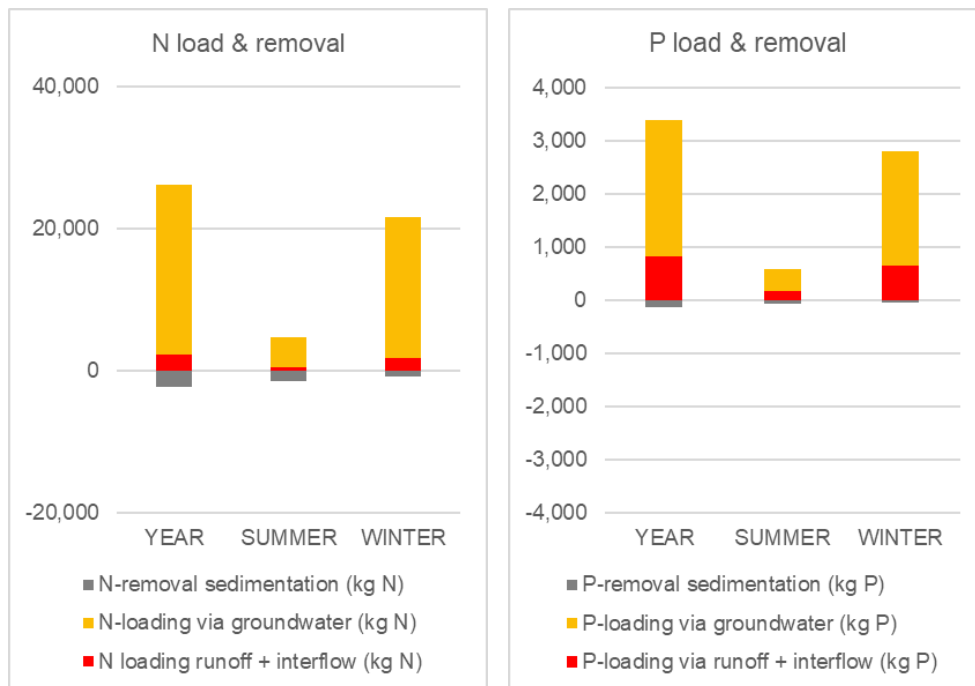
Tabel 3. Gehalte zwevend stof en daaraan gebonden N en P, gemiddeld over alle beschikbare metingen uit Friese polders op veenbodem (data Wetterskip Fryslân). ¹ SS is zwevend stof.

Parameter	Zomer		Winter	
SS (mg/l) ¹	11,9	(n=5)	20,2	(n=4)
N-opgelost SS-monsters (mg/l)	0,99	(n=4)	3,93	(n=4)
N-zwevend SS-monsters (mg/l)	1,14	(n=4)	2,42	(n=4)
N-gehalte SS (kg N/kg SS)	0,13	(n=4)	0,12	(n=4)
P-opgelost SS-monsters (mg/l)	0,014	(n=4)	0,029	(n=4)
P-zwevend SS-monsters (mg/l)	0,064	(n=4)	0,12	(n=4)
P-gehalte SS (kg P/kg SS)	0,0072	(n=4)	0,0019	(n=4)

Figuur 11 geeft een inschatting van de potentiële bijdrage van sedimentatie, uitgaande van de N- en P-belasting en percelering in de Veenpolder van Echten, en de inschatting van zwevend stof en daaraan gebonden N en P in tabel 3.

De bijdrage van sedimentatie aan nutriëntenverwijdering blijkt groter te zijn voor N dan voor P. 's Winters wordt voor N ca. 4% verwijdering via sedimentatie berekend, voor P is dit ca. 2%. Indien wordt verondersteld dat resuspensie door wind geen rol speelt, dan wordt 's winters 14% verwijdering van de N-belasting berekend, en 6% verwijdering van de P-belasting.

Dit zijn grove inschattingen, omdat de gehanteerde rekenmethodiek leidt tot een onrealistisch grote toename van de verblijftijd, te weten van 6 dagen in een situatie met geschoonde sloten naar 30 dagen in een situatie met dichtgegroeide sloten. In werkelijkheid zal hierdoor de waterdiepte toenemen, waardoor de stroomsnelheid weer toeneemt en de verblijftijd afneemt. Deze terugkoppeling is niet meegenomen in de berekeningen.



Figuur 11. N- en P-belasting in de Veenpolder van Echten en potentiële N- en P-verwijdering door sedimentatie.

Nutriëntenverwijdering uit puntbronnen

In polders kunnen puntbronnen met verhoogde nutriëntenbelasting voorkomen, bijvoorbeeld doordat een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) aanwezig is en haar effluent loost op het slotenstelsel. Voor inschatting van de effectiviteit van zuiverende moerassen om deze nutriëntenbelasting te beperken gaan we uit van een hypothetische RWZI waarin afvalwater van 50.000 inwoners wordt behandeld. We gaan er van uit dat de belasting met nutriënten en zwevend stof niet varieert tussen de seizoenen, omdat ze afhankelijk zijn van het aantal inwoners en niet van het weer. Een dergelijke RWZI genereert dan een droogweeraanvoer (effluent bij droog weer) van ca. 300 m³/uur. De nutriëntenconcentratie in het effluent schatten we in op basis van Bruning, Postma & Jonker (2008). Het gehalte aan zwevend stof schatten we in op ca. 5 mg/l. De gehanteerde belasting is weergegeven in tabel 3. De simulatie gaat uit van dezelfde specifieke sedimentatiesnelheid als is gehanteerd in voorgaande simulaties (0,2 m/d). Voor de vegetatie gaan we uit van begroeiing met Grote lisdodde en vanwege de hogere P-belasting gaan we uit van een hogere biomassaproductie (15 ton ds/jaar).

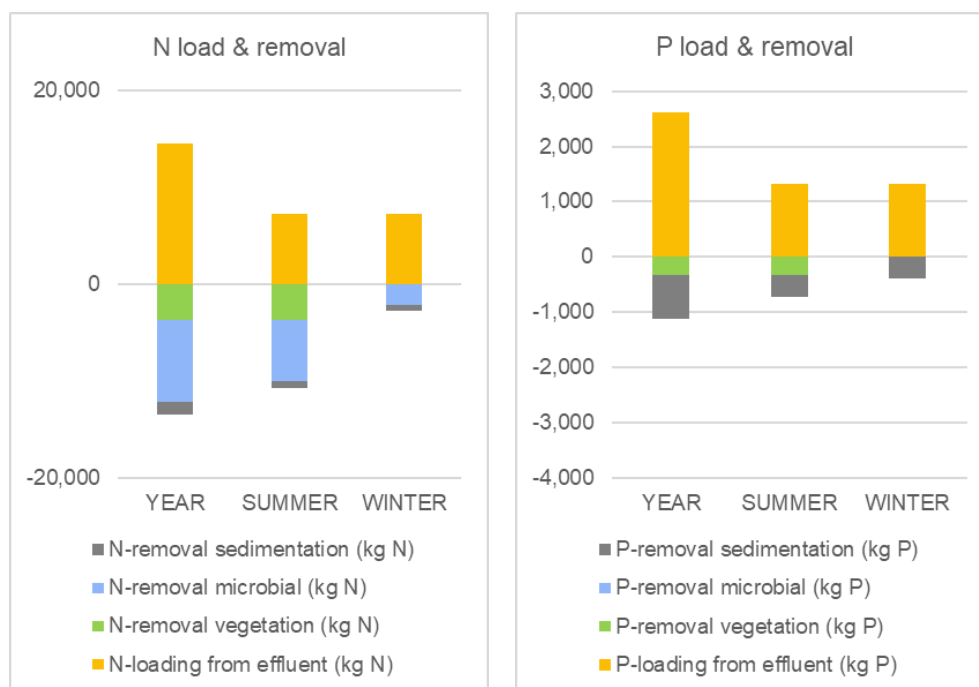
Om sedimentatie te laten bijdragen aan winterse P-verwijdering moet de verblijftijd in het moeras lager worden dan de benodigde tijd voor sedimentatie. Uitgaande van een zuiveringsmoeras met 0,5 m waterdiepte wordt een sedimentatietijd van 9 dagen berekend. Bij een oppervlakte van 15 ha is de verblijftijd ca. 10 dagen, zodat sedimentatie op kan treden. De berekende N- en P-verwijdering voor deze situatie is weergegeven in figuur 12. Op jaarbasis is de potentiële verwijdering van N vergelijkbaar met de belasting (94%), maar in de zomer

overstijgt de potentiële verwijdering de N-belasting. 's Winters wordt 39% N-verwijdering berekend, vooral door microbiële N-verwijdering.

Tabel 4. Nutriëntenbelasting van effluent uit een hypothetische RWZI met droogweeraanvoer van 300 m³/uur (data N- en P-concentraties uit Bruning, Postma & Jonker 2008).

Parameter	Concentratie (mg/l)	Belasting (kg/jaar)
SS	5,0	13.140
totaal-P (mg P/l)	1,0	2.628
Opgelost P (mg P/l)	0,8	2.102
Gesuspendeerd P (mg P/l)	0,3	788
Totaal-N (mg N/l)	5,5	14.454
Opgelost N (mg N/l)	5	13.140
Gesuspendeerd N (mg N/l)	0,5	1.314

's Winters leidt alleen sedimentatie tot P-verwijdering. Hiervoor wordt 30% verwijdering berekend, wat overeenkomt met de aan zwevend stof gebonden P-belasting. 's Zomers wordt 55% P-verwijdering berekend doordat ook opname in plantengroei mee gaat spelen.

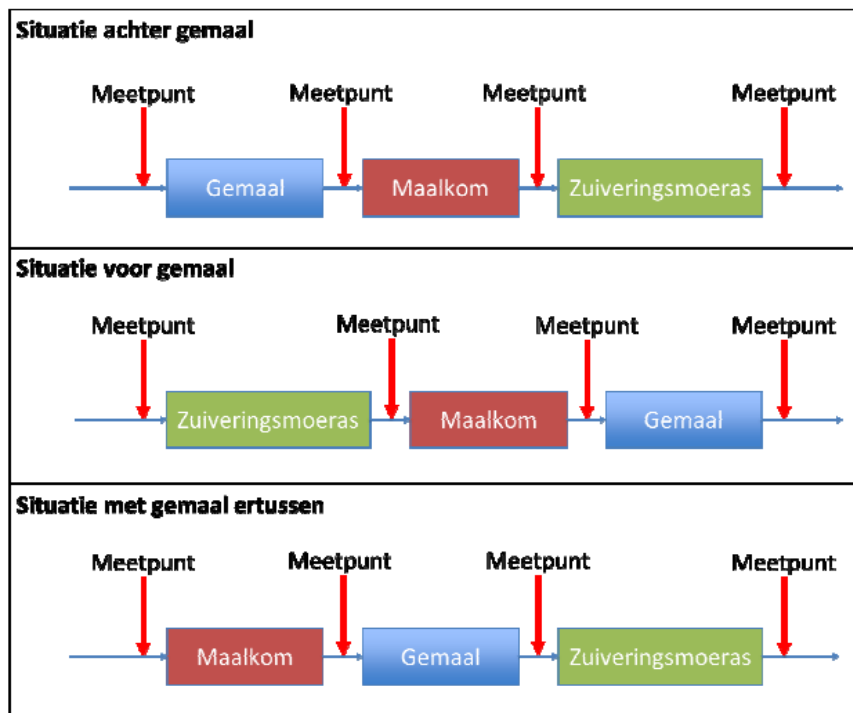


Figuur 12. N- en P-belasting uit effluent van een hypothetische kleine RWZI en de berekende N- en P-verwijdering in een 15 ha groot zuiveringsmoeras.



Nutriëntenverwijdering in zuiverende maalkommen

De totale nutriëntenbelasting uit diffuse- en puntbronnen in een polder komt samen bij het gemaal, van waaruit het wordt uitgeslagen naar de boezem. Dit gaat over locatie 3 in figuur 1. Door hier een groter zuiveringsmoeras aan te leggen kunnen nutriënten worden verwijderd voordat het water in het boezemsysteem terecht komt. Dit wordt wel een zuiverende maalkom genoemd, hoewel meestal wordt gekozen voor een inrichting met een maalkom en een zuiveringsmoeras. In de maalkom krijgt sediment de kans te bezinken, waarna de opgeloste nutriënten worden omgezet in biomassa in het zuiveringsmoeras. Er zijn verschillende configuraties van het samenstel gemaal – maalkom – zuiveringsmoeras mogelijk (figuur 13).

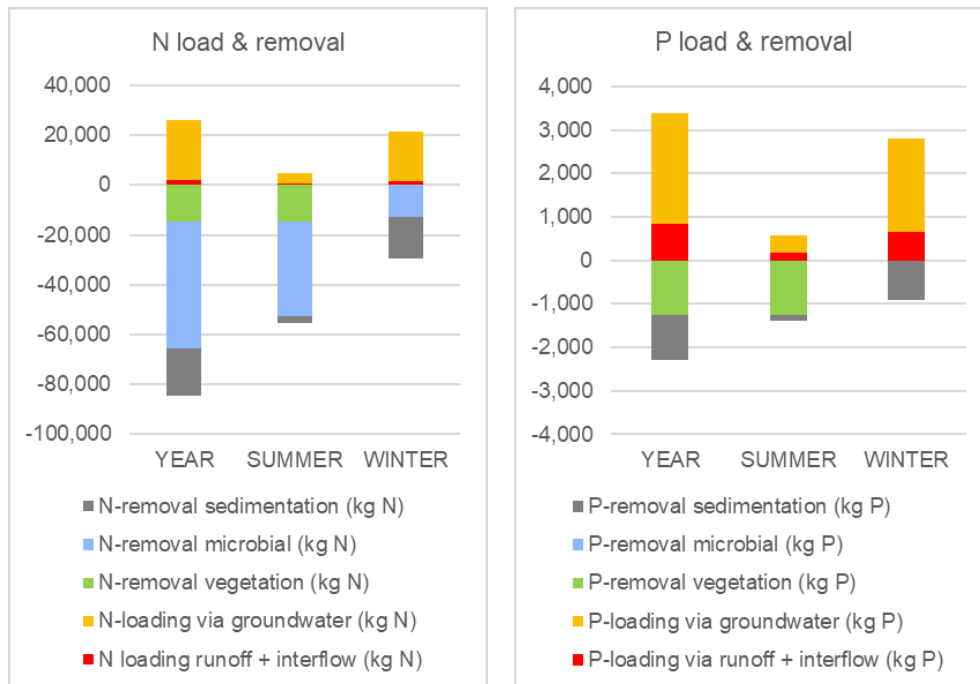


Figuur 13. Inrichtingsvarianten zuiverende maalkommen (Wetterskip Fryslân, 2020).

De potentiële effectiviteit van een zuiverende maalkom simuleren we door een situatie met enkel een zuiveringsmoeras door te rekenen. Sedimentatie is dan beperkt tot de sedimentatie tussen de stengels van de planten. Uiteindelijk is een zuiveringsrendement van 25% tot 50% voor N en P gewenst (mededeling J. Roelsma, Wetterskip Fryslân). Figuur 14 geeft resultaten voor de zuiveringspotentie van een 90 ha groot zuiveringsmoeras begroeid met Grote lisdodde, in de Veenpolder van Echten. Deze 90 ha komt overeen met ca. 4% van het landbouwareaal (zijnde 2.326 ha). De productiviteit is ingeschat op 10 ton ds/ha/yr en de waterdiepte bedraagt 50 cm. De gemiddelde verblijftijd in de winter bedraagt dan 13 dagen. Bij een geringere diepte neemt de verblijftijd snel af en moet het moeras dus groter worden om toch volledige sedimentatie te bereiken.

Zowel voor de zomersituatie als voor de wintersituatie wordt hogere potentiële N-verwijdering berekend dan de belasting. Voor P-verwijdering wordt 's winters 32% verwijdering berekend,

alleen door sedimentatie. 's Zomers is de bijdrage van sedimentatie geringer, doordat het water minder zwevend stof bevat. Vooral door opname van P in plantenbiomassa wordt voor de zomer meer P-verwijdering dan -belasting berekend.



Figuur 14. Potentieel zuiveringsrendement voor een vlakvormig, 90 ha groot en 0,5 m diep zuiveringsmoeras met Grote lisdodde voor het gemaal in de Veenpolder van Echten.



5. Effecten op biodiversiteit

Inzetten op moerasvegetatie voor waterzuivering kan als gunstig neveneffect hebben dat leefgebied voor soorten ontstaat. Mettrop (2021) heeft voor deze studie op een rij gezet wat al bekend is over de bijdrage van natte teelten aan biodiversiteit. Hier worden de enkele hoofdlijnen uit dat rapport gepresenteerd.

Welke soorten?

Waar het gaat om verandering van grasland in lisdodde- of rietvelden gaat het om een verschuiving van een terrestrisch biotoop naar een aquatisch biotoop. Bijgevolg profiteren vooral soorten van moeras en water hiervan. Voor wat betreft de flora betekent dit dat kansen ontstaan voor moerasplanten, voor zover deze niet worden bestreden ten behoeve van maximale biomassa-productie van lisdodde of riet.

Door ten Dam & van Duinen (Stichting Bargerveen) zijn de geledpotigen vergeleken tussen lisdoddeteeltbedden en grasland in It Bûtefjild. In termen van aantallen individuen blijkt dit vooral te gaan om toename van tweevleugeligen, waarbij een verschuiving optreedt van vliegen en galmuggen in grasland naar dansmuggen in lisdoddeteelt. In termen van biomassa gaat het vooral om een verschuiving van kevers, tweevleugeligen en vlinders in grasland naar libellen en tweevleugeligen in lisdoddeteelt.

Bij de vogels gaat het vooral om een toename van foeragerende en – als het beheer het toelaat en het veld voldoende groot is – om broedende moerasbroedvogels. In drogere omstandigheden kunnen soorten als Rietzanger en Blauwborst optreden, maar bij 50 cm diepte gaat het om de ‘echte’ moerasbroedvogels zoals Waterral, Roerdomp en Kleine karekiet. Hoe groot een gebied moet zijn om als broedbiotoop te fungeren verschilt per soort. Een functie als tijdelijk leefgebied zal eerder op kunnen treden dan als broedbiotoop. Een zuiveringsmoeras kan dan fungeren als foerageergebied, of als ‘stapsteen’ tussen grotere geschikte leefgebieden.

Bij zoogdieren gaat het met name om Dwergmuis, Bruine rat en Woelrat, en langs de randen Waterspitsmuis.

Bij de amfibieën valt de Heikikker op, daarnaast valt te verwachten dat met name Bruine kikker en Meerkikker kunnen profiteren. Voor deze soorten geldt wel dat ze behoefte hebben aan open, zonnige plaatsen tussen de vegetatie, dus dat de stengeldichtheid niet te hoog moet worden. Daarnaast mag ook Kleine watersalamander verwacht worden.

Bij de reptielen kan de Ringslang profiteren.

Moerassen met ondiep water kunnen een functie hebben als paaigebied voor vissen, mits het moeras bereikbaar is, dus in verbinding staat met ander water. Een andere voorwaarde is dat de stengeldichtheid niet te hoog moet zijn, en dat open plekken aanwezig zijn voor ei-afzet.



Beheer voor soorten

Te hoge stengeldichtheid duidt op een eerste mogelijk conflict tussen mogelijke functies: Voor maximale opname van nutriënten in de vegetatie is maximale biomassa-productie van lisdodde of riet gewenst. Maar dit leidt tot een zeer dichte vegetatie waar moerasvogels, amfibieën, vissen en mogelijk ook andere soortgroepen moeilijk tussendoor kunnen. Verder is enige afwisseling in waterdiepte en dichtheid van de begroeiing gunstig voor verschillende soorten.

Voor bijdrage aan biodiversiteit is speciale aandacht nodig voor het maaibeheer. Maaïen in het voorjaar maakt het gebied ongeschikt als broedgebied voor vogels, maar kan wellicht gunstig uitpakken voor amfibieën doordat de zon beter doordringt tot de bodem. Maaïen in de winter is ongunstig voor in de vegetatie overwinterende zoogdieren (Dwergmuis!) en geleedpotigen. Negatieve effecten van maaibeheer kunnen worden beperkt door te maaïen/oogsten buiten het broedseizoen, dus niet tussen 15 maart en 15 juni. Daarnaast kunnen delen van de vegetatie (ca. 10 – 20%) jaarlijks worden gespaard. Daarbij moet er wel voor worden gewaakt steeds een ander deel 'over te laten staan', zodat opslag bomen en struiken wordt voorkomen.

Beheer voor zuivering

In de verkenning van de zuiverende werking is geconstateerd dat in de winter sedimentatie nodig is om P-verwijdering te bereiken. Dat pleit er voor de vegetatie niet, of in ieder geval niet te kort, te oogsten in het najaar ten behoeve van luwte in de waterkolom. Vanuit dit oogpunt is maaïen aan het einde van de winter wellicht te prefereren. Dat combineert goed met over laten staan van de vegetatie voor overwinterende fauna, maar lijkt lastig te combineren met maaïen buiten het broedseizoen, aangezien dit start op 15 maart. Voor maximale verwijdering van nutriënten in biomassa is echter juist oogst direct na de groeiperiode gewenst, dus aan het begin van de winter (begin oktober).



6. Conclusie

In dit project is modelmatig verkend wat nutriëntenbelasting uit diverse diffuse- en puntbronnen in een Fries poldergebied is, en in hoeverre de inzet van natte teelten bij kan dragen aan het verminderen van de nutriëntenbelasting van de Friese boezem vanuit deze bronnen. Tenslotte is ingeschat wat de inzet van natte teelten kan bijdragen aan behoud van biodiversiteit.

Beperkingen van deze studie

Deze studie is bedoeld als haalbaarheidsstudie. Zowel de uit- en afspoeling uit landbouwpercelen zijn modelmatig berekend op basis van gemiddelden voor een half jaar, dat betekent dat de resultaten moeten worden gezien als onderbouwde schattingen. Sommige aspecten bleken bovendien moeilijker te berekenen dan andere. Bij de berekening van uit- en afspoeling blijkt het lastig de oppervlakkige stromen (1 en 2 in figuur 2) te onderscheiden van de diepere. Bij de berekening van nutriëntenverwijdering moet er mee rekening worden gehouden dat de berekening is opgezet als schatting van de potentiële verwijdering. De verwijderingen zijn niet gemaximeerd op de belasting, waardoor de berekende N-verwijdering vaak hoger uitpakt dan de belasting. In de praktijk zal dit natuurlijk nooit langdurig zo kunnen zijn, tenzij een niet-beschouwde toevoer meespeelt.

Voor P-verwijdering blijkt sedimentatie van groot belang, maar de berekening van sedimentatie is omgeven met forse onzekerheden. Enerzijds is dit het gevolg van de complexiteit van het proces van sedimentatie, anderzijds speelt gebrek aan data een rol. Qua complexiteit zijn de belangrijkste kanttekeningen:

- De berekeningen houden geen rekening met resuspensie van gesedimenteerd materiaal. Deze is afhankelijk van de waterdiepte en -breedte, oriëntatie van watergangen op wind en stroming, en variatie in wind en neerslag. Om dit toch enigszins mee te kunnen nemen, kan de gebruiker aangeven welk aandeel van het seizoen geschikte omstandigheden voor sedimentatie kent;
- Stroomsnelheidsverlaging door begroeiing leidt tot een groter verhang binnen een polder, waardoor de stroomsnelheid weer toeneemt. Dit is niet opgenomen in de berekeningen;

Qua databeschikbaarheid zijn de kanttekeningen:

- De specifieke sedimentatiesnelheid speelt een belangrijke rol, maar hiervan zijn zeer weinig schattingen voorhanden. In de berekeningen is uitgegaan van een conservatieve schatting op basis van resultaten voor de Hunze (Mouissie, van Belle, van Diggelen, & Knol, 2008).
- Van het gehalte zwevend stof in polderwater en de samenstelling hiervan is zeer weinig data beschikbaar. De berekeningen gaan uit van de beschikbare data van Wetterskip Fryslan, wat voor veenpolders neerkomt op 5 monsters voor het zomerhalfjaar en 4 monsters voor het winterhalfjaar.

Tenslotte moet er rekening mee worden gehouden dat de verwijdering van nutriënten door plantengroei afhankelijk is van oogst van die planten. Het tijdstip van oogst beïnvloed hoeveel

nutriënten verwijderd kunnen worden. In deze studie is voor de helofyten uitgegaan van oogst in het begin van de herfst (oogst eind september – begin oktober).

N en P uit landbouwpercelen

In een landbouwpolder zijn landbouwpercelen de belangrijkste diffuse bronnen van nutriëntenbelasting. De N- en P-emissie uit landbouwpercelen blijkt in de zes gemodelleerde polders in de periode 2010 – 2017 te variëren tussen polders en tussen percelen. Op polderniveau varieert de gemiddelde N-emissie van 11,4 tot 19,1 kg N/ha/yr, terwijl deze voor P-emissie varieert tussen 0,9 en 2,3 kg P/ha/yr (tabel 1). De variatie tussen percelen en tussen jaren is aanzienlijk groter. Voor N-emissies is de variatie opvallend groot in polder De Fjouwer Kritten (95%-interval ca. 10 – 45 kg N/ha/yr), wat vrijwel volledig via verzadigde grondwaterstromen in de sloten komt. In de overige polders is de variatie minder groot. Voor P-belasting is de variatie opvallend groot in de Veenpolder van Echten: alleen al voor de route via verzadigde grondwaterstroming variëren de waarden van ca. 0,2 tot 4,0 kg P/ha/yr (95%-interval). Voor P-emissies blijkt de route via onverzadigde grondwaterstromen en afspoeling bovendien van veel groter belang dan voor N-emissies het geval is. De variatie in die route (ca. 0,1 – 1 kg P/ha/yr in de Veenpolder van Echten) telt dus op bij de variatie in de verzadigde grondwaterstroming. In andere polders is de variatie geringer, maar overall is de variatie in P-emissies groter dan die van N-emissies.

N- en P-verwijdering in perceelranden en sloten

Diffuse stromen uit landbouwpercelen kunnen wellicht worden afgevangen met helofyten als randenteelt langs percelen (op het land), of met helofyten in de sloten. Uit de modelmatige verkenningen blijkt dat het afvangen van N- en P-belasting uit afspoeling en ondiepe uitspoeling op jaarbasis bezien zeer haalbaar lijkt. P-verwijdering blijkt moeilijker dan N-verwijdering, zodat de verwijderingspotentie voor P maatgevend is voor inrichtingsvragen. Lisdodde is een betere kandidaat voor gewasgroei in zuiverende moerassen dan Riet, omdat lisdodde meer P opneemt. De belangrijkste beperking voor invang in randenteelt is dat de meeste emissie optreedt in de winter (83% in de berekende situatie), terwijl plantengroei beperkt is tot het zomerhalfjaar (figuur 10). Als het zou lukken de winter-emissie in te vangen in een lisdodderand wordt de bijdrage aan zuivering beperkt doordat deze alleen ondiepe nutriëntenstromen afvangt. Deze bedraagt ca. 18 – 23% van de totale P-emissie.

Sedimentatie van aan onopgeloste bestanddelen gebonden P (en N) kan zuivering in de winter stimuleren. Sedimentatie kan worden gestimuleerd door sloten vol te laten groeien met helofyten en pas na de winter te schonen. Voor de Veenpolder van Echten wordt hiermee echter slechts 2 – 6% verwijdering van de winterse P-belasting berekend. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de modellering van sedimentatie lastig blijkt te zijn, waardoor deze getallen als zeer grove indicatie gezien moeten worden. In de praktijk leidt het 's winters dicht laten groeien van sloten bovendien tot problemen met het waterbeheer.

N- en P-verwijdering uit puntbronnen

Waar puntbronnen aanwezig zijn kan een vlakvormig zuiveringsmoeras worden ingezet voor verwijdering van N en P. Dit is gesimuleerd voor zuivering van effluent van een hypothetische kleine RWZI. Zoals hiervoor beschreven is P-verwijdering maatgevend, wat in de winter moet worden bewerkstelligd met sedimentatie. In vlakvormige moerassen kan sedimentatie worden



bereikt door de dimensionering van het moeras af te stemmen op de ontvangen waterstroom, zodat een voldoende grote verblijftijd wordt bereikt. In het rekenvoorbeeld volstaat een zuiveringsmoeras van 15 ha, bij een kleiner formaat wordt geen sedimentatie berekend. Met sedimentatie kan theoretisch de volledige sedimentlast neerslaan. In het rekenvoorbeeld leidt dit tot 30% P-verwijdering in de winter (figuur 11). In de praktijk zal de bijdrage hiervan volledig afhankelijk zijn van de sedimentlast en -samenstelling van water uit de puntbron.

N- en P-verwijdering bij zuiverende maalkommen

De werking van zuiverende maalkommen is gesimuleerd door nutriëntenverwijdering in een vlakvormig zuiveringsmoeras tussen de polder en het gemaal te berekenen. Hiervoor geldt wederom dat de dimensionering afgestemd moet worden op de ontvangen waterstroom in de winter, zodat 's winters sedimentatie kan optreden. Voor de Veenpolder van Echten is hiervoor een zuiveringsmoeras van 90 ha nodig, wat overeenkomt met ca. 4% van het landbouwareaal. Hiermee wordt ca. 32% verwijdering van de winterse P-belasting berekend, en 's zomers wordt de volledige P-belasting verwijderd door plantengroei en sedimentatie (figuur 14). Ook hier gelden de kanttekeningen dat het moeilijk blijkt sedimentatie te berekenen, en dat de bijdrage van sedimentatie per situatie af zal hangen van de sedimentlast. Bovendien gaan de berekeningen uit van een gemiddelde verblijftijd over het gehele seizoen, terwijl een zuiverende maalkom te maken krijgt met pieken en dalen in stroomsnelheid (en dus in verblijftijd).

Wat kunnen zuiveringsmoerassen bijdragen aan vermindering van nutriëntenemissies uit landbouwpolders?

De conclusie uit het voorgaande luidt dat verwijdering van N uit oppervlaktewater zeer goed mogelijk lijkt. Verwijdering van P is met name in de winter lastig, en de winterperiode is nu juist de periode met de hoogste P-belasting. 's Winters kan alleen sedimentatie bijdragen aan P-verwijdering. In sloten lijkt de potentie van sedimentatie beperkt. In vlakvormige zuiveringsmoerassen biedt sedimentatie kansen, mits

- Het aandeel sedimentgebonden P in de belasting hoog genoeg is;
- De ruimte beschikbaar is om het zuiveringsmoeras dusdanig te dimensioneren dat sedimentatie kan optreden. In de Veenpolder van Echten lijkt ongeveer 4% van het landbouwareaal nodig voor afdoende nutriëntenverwijdering. Dat strookt met wetenschappelijke analyses, zo vonden Verhoeven et al. (2006) dat 2 – 7% van een stroomgebied moet bestaan uit wetlands voor verbetering van de waterkwaliteit.

Wat draag dit bij aan behoud van biodiversiteit?

Waar grasland wordt omgevormd naar zuiveringsmoeras kunnen soorten van moerassen hiervan profiteren. Dit gaat om een breed scala aan soorten, zie Mettrop (2021) voor details. Tijdelijk leefgebied is vooral voor de grotere soorten (vogels, zoogdieren) eenvoudiger te realiseren dan vast verblijfsgebied. Dergelijke kleinere gebieden kunnen als stapstenen bijdragen aan de passeerbaarheid van het landschap (c.f. faunapassages). Voor vast verblijfsgebied of voortplantingsgebied zijn vaak grotere oppervlaktes nodig. Overigens zal een zuiveringsmoeras van 90 ha, de benodigde oppervlakte die werd berekend voor de zuiverende maalkom, voldoende groot zijn voor de meeste moerasbroedvogels. Een ééntonig dichte massavegetatie van bijvoorbeeld lisdodde kan echter ondoordringbaar dicht worden voor

dergelijke soorten. Voor veel van de kleinere soorten (geleedpotigen, vissen, amfibieën) geldt dat de aanwezigheid van open plekken gunstig is in verband met zoninval.

De oogst van biomassa verdient aandacht, want het lijkt er op dat niet alle doelen tegelijk gecombineerd kunnen worden. Voor maximale nutriëntenverwijdering met vegetatie ligt oogst begin oktober voor de hand, maar dat is mogelijk ongunstig voor sedimentatie in de winter en voor in de vegetatie overwinterende fauna. Oogst aan het begin van het voorjaar (maart) lijkt gunstig voor sedimentatie in de winter, overwinterende fauna en amfibieën, maar is moeilijker te combineren met broedgebied voor vogels.

Toepassing in planvorming

Vooraf de inzet van zuiveringsmoerassen aan het eind van het slootsysteem van een polder, dus net voor of na het gemaal, lijkt haalbaar en effectief. Hiervoor zijn wel aanzienlijke oppervlaktes nodig. Het gevonden getal van 4% van het landbouwareaal lijkt mee te vallen, maar vertaalt zich toch naar een aanzienlijk areaal (90 ha in deze studie). Door de biomassa te oogsten en verwaarden kan dit areaal toch nog een productieve functie behouden. Zo wordt het zuiveringsmoeras een paludicultuurveld. Een dergelijk zuiveringsmoeras kan ook een rol spelen in opvangen van piekafvoeren, zodat het bij kan dragen aan een meer klimaatrobust watersysteem.



7. Aanbevelingen

Deze haalbaarheidsstudie toont aan dat zuiveringsmoerassen kunnen helpen de waterkwaliteit in de boezem te verbeteren. Alvorens daartoe op grote schaal over te gaan is het verstandig deze resultaten nader te onderbouwen en te detailleren in vervolgonderzoek. Hierbij gaat het er enerzijds om modelparameters beter te onderbouwen, en anderzijds om te onderzoeken of deze resultaten in (gecontroleerde) praktijksituaties stand houden.

Voor wat betreft de onderbouwing van modelparameters gaat het om

- Sedimentatie:
 - o Betere onderbouwing van de sedimentlast en -samenstelling in polderwater van verschillende polders, en de variatie hiervan met verschil in bodemsamenstelling en landgebruik. Bijvoorbeeld met een uitgebreide meetcampagne;
 - o Betere onderbouwing van de specifieke sedimentatiesnelheid en de variatie hiervan tussen polders met verschillende bodemsamenstelling en landgebruik;
 - o Validatie aan de hand van sedimentatiemetingen en het effect van weersgesteldheid en waterdiepte hierop, bijvoorbeeld met sediment-invangproeven met matjes.
- Nutriëntenverwijdering in biomassa:
 - o Verkenning van het effect van verschillende oogstmomenten op nutriëntenverwijdering;
 - o Onderbouwing van de nutriëntenverwijdering door het verwijderen van slootbegroeiing, inclusief ondergedoken waterplanten. Bijvoorbeeld door de in het veld de (variatie in) jaarlijkse biomassaverwijdering te bepalen en hiervan de verdeling over soort(groep)en en N- en P-gehalten te bepalen.
- Stikstofverwijdering door microbiële processen:
 - o Het model berekend potentiële N-verwijdering die hoger is dan de belasting. Kennelijk wordt deze verwijdering in de praktijk gelimiteerd. Door te bepalen wat de belangrijkste beperkende factor is / factoren zijn kan het model op dit punt worden verbeterd.

Verder lijkt de beschikbaarheid van goede invoer van de nutriëntenbelasting beperkend te zijn voor de toepassing van het ontwikkelde model. Een onderbouwde inschatting van variatie van de belasting per polder in relatie tot variatie in landgebruik kan dit knelpunt verlichten.

Tenslotte is het model in dit project niet gevalideerd. Het is nu dus nog een op de literatuur gebaseerde, onderbouwde inschatting, maar de accuratesse van de resultaten is niet gevalideerd. Uitvoeren van een validatiestudie is van belang voor de interpretatie van de resultaten en is een grote stap naar betere toepasbaarheid als beslissingondersteunend gereedschap. Toepassing van het – bij voorkeur nader onderbouwde en gevalideerde - modelinstrument voor een scala aan polders kan bijvoorbeeld worden gebruikt om richtlijnen te vast te stellen voor het benodigde oppervlak zuiveringsmoeras als percentage van het landbouwareaal.





9. Bibliografie

- Bot, B. (2016). *Grondwaterzakboekje Gwz2016*. Rotterdam: Bot Raadgevend Ingenieur.
- Bruning, C., Postma, J., & Jonker, R. (2008). *Biobeschikbaarheid van stikstof en fosfaat in RWZI-effluent*. Utrecht: STOWA.
- Deelexpeditie Natte Teelten. (2019). *Factsheet Natte teelten*. Nationaal Kennisprogramma Bodemdaling.
- Escobar, M. M., Voyevoda, M., Fühner, C., & Zehnsdorf, A. (2011). Potential uses of Elodea nuttallii-harvested biomass. *Energy, Sustainability and Society*, 4.
- Geurts, J., Fritz, C., Lamers, L., Grootjans, A., & Joosten, H. (2017). Paludicultuur houdt de polder schoon - zuiveren van oppervlaktewater en uitmijnen van fosfaatrijke bodems met riet-en lisdodde. *H2O-online* (23 augustus). Opgehaald van <https://www.h2owaternetwerk.nl/vakartikelen/paludicultuur-houdt-de-polder-schoon-zuiveren-van-oppervlaktewater-en-uitmijnen-van-fosfaatrijke-bodems-met-riet-en-lisdodde>
- Geurts, J., Oehmke, C., Lambertini, C., Eller, F., Sorrell, B., Mandiola, S., . . . Fritz, C. (2020). Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soils. *Science of the Total Environment*, 141102.
- Groenendijk, P., van Gerven, L., & van Boekel, E. (in prep.). *Maatregelen op en rond landbouwpercelen ter vermindering van de uit- en afspoeling van nutriënten. Achtergrondinformatie over de maatregelen ten behoeve van de Nationale Analyse Waterkwaliteit*.
- Heinen, M., Brouwer, F., Teuling, K., & Walvoort, D. (2021). *BOFEK2020 - Bodemfysische schematisatie van Nederland; Update bodemfysische eenhedenkaart*. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- Hennekens, S., Schaminée, J., & Stortelder, A. (2001). SynBioSys, een biologisch kennisstelsel ten behoeve van natuurbeheer, natuurbeleid en natuurontwikkeling. Wageningen: Alterra.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. New York: Lewis Publishers.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* (2nd ed.). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Kostel, J. (2021, 03 17). *Nutrient removal*. Opgehaald van The Wetlands Initiative: <http://www.wetlands-initiative.org/nutrient-removal>
- Land, M., Granéli, W., Grimvall, A., Hoffmann, C., Mitsch, W., Tonderski, K., & Verhoeven, J. (2016). How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environ Evid*, 5(9), 1-26.
- Mettrop, I. (2021). *Natte teelten en biodiversiteit. Een kennisoverzicht met speciale aandacht voor lisdodde- en veenmosteelt*. Feanwâlden: Altenburg & Wymenga ecologisch onderzoek.
- Mouissie, A., van Belle, J., van Diggelen, R., & Knol, J. (2008). *Nutriëntenverwijdering in moerassen langs de Hunze. Onderzoeksresultaten en aanbevelingen voor plan Tusschenwater*. Houten: Grontmij Nederland bv.
- Olin, T., Fischenich, J., Palermo, M., & Hayes, D. (2000). *Wetlands Engineering Handbook*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

- Ros, G., & Verweij, S. (2019). *Bodem- en waterkwaliteit in het beheergebied van Wetterskip Fryslân. Een ruimtelijke analyse*. Wageningen: Nutriënten Management Instituut NMI B.V.
- STOWA. (1993). *Handboek stikstofverwijdering*. Utrecht: STOWA.
- van Boekel, E., Groenendijk, P., & Renaud, L. (2016). *Bronnen van nutriënten in het oppervlaktewater in het beheergebied van Wetterskip Fryslân; Studie naar de herkomst en beïnvloedbaarheid van stikstof en fosfor in het oppervlaktewater voor zes polders in het beheergebied van Wetterskip Fryslân*. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- van Boekel, E., Groenendijk, P., & Renaud, L. (2017). *Maatregelen voor het verlagen van de nutriëntenbelasting uit landbouwpercelen. Effecten van landbouwkundige maatregelen op de nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in zes polders in het beheergebied van Wetterskip Fryslân*. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- van Gerven, L., & van Boekel, E. (2020). *Uit- en afspoeling van nutriënten vanuit landbouwpercelen naar oppervlaktewater. Een modelstudie ter kwantificering van ondiepe en diepe uitspoelroutes voor zes polders in Friesland*. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- van Zuidam, J. P. (2013). *Macrophytes in drainage ditches. Functioning and perspectives for recovery*. Wageningen: Wageningen University.
- Verhoeven, J., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. (2006). Regional and global concerns over wetland and water quality. *Trends in Ecology and Evolution*, 96-103.
- Wetterskip Fryslân. (2020). *Praatplaat zuiverende maalkommen*. Leeuwarden.
- Wolf, J., Beusen, A., Groenendijk, P., Kroon, T., Ratter, R., & van Zeijts, H. (2003). The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emissions from agriculture in the Netherlands. *Environmental Modelling & Software*, 18, 597-617.