

Praktijkproef ijzersuppletie voor fosfaatvastlegging in laagveenplassen

Clara Chrzanowski (Deltares), Jeroen Geurts (Radboud Universiteit, Onderzoekcentrum B-WARE), Gerard ter Heerdt (Waternet), Anne Immers (NIOO, VitenS), Steven Declerck (NIOO)

De laagveenplas Terra Nova kampt al jaren met blauwalgenbloei en lage bedekkingen met waterplanten, ondanks jaarlijkse biomanipulatiemaatregelen. Een belangrijke oorzaak hiervan is de fosfaatrijke waterbodem met een laag ijzergehalte, die zorgt voor een hoge fosfaataflevering naar de waterlaag. Om het ijzergehalte van de bodem te verhogen, werd geleidelijk ijzer aan de plas toegevoegd gedurende anderhalf jaar. Tijdens en na de ijzersuppletie daalden de fosfaatconcentraties in de waterlaag naar historisch lage niveaus, met helder water, waterplantenontwikkeling en het verdwijnen van algenbloei tot gevolg. Het is onduidelijk of de verlaagde fosfaataflevering langdurig zal zijn.

In de laagveenplas Terra Nova (85 ha) bij Loenen aan de Vecht kwamen van 1987 tot 2004 jaarrond blauwalgenbloeien voor (vooral *Aphanizomenon* sp. en *Planktothrix* sp.). Hoge nutriëntenbelastingen [1] hebben ervoor gezorgd dat er erg veel fosfaat opgehoopt is in de waterbodem en een dikke sliblaag van gemiddeld 37 cm dik is ontstaan door veenafbraak. Bovendien is door het verdwijnen van ijzerrijk kwelwater niet meer voldoende ijzer beschikbaar in de bodem om fosfaat te binden [2]. Dit zorgt voor een aflevering van fosfaat van de bodem naar de waterlaag [3], zodat er algen kunnen gaan groeien.

Omdat bodemwoelende vissen zorgden voor extra troebel water en de graasdruk door watervlooien sterk verlaagden, is vanaf de winter van 2003/2004 jaarlijks de aanwezige brasem afgevist (biomanipulatie [4]). In het eerste jaar zorgde dit voor een verbetering van het doorzicht, met waterplantenontwikkeling tot gevolg [5]. In 2005 trad echter opnieuw blauwalgenbloei op, dit keer gedomineerd door *Anabaena* sp. en later ook *Microcystis* sp. [6], een ontwikkeling die gepaard ging met het geleidelijk verdwijnen van de ondergedoken waterplanten. De oorzaak hiervan was dat de P-belasting nog steeds te hoog bleek te zijn om de omslag naar troebel water te voorkomen [1]. Daarom werden vanaf 2010 maatregelen getroffen om zowel de externe als de interne belasting te verlagen door het plaatsen van een stuw tussen het noordelijke en zuidelijke deel van de plas (2013) en het toedienen van ijzer aan de bodem (2010-2011).

Ijzersuppletie, maar dan geleidelijk

Ijzersuppletie (de toevoeging van ijzer) is een al langer bekende maatregel in laagveenwateren om het fosfaatbindend vermogen van de bodem te vergroten en de interne fosfaatbelasting tegen te gaan [7]. Deze methode is effectief, mits de externe belastingen van fosfaat en sulfaat laag genoeg zijn [3]. In een laagveenplas met lage externe belastingen is grootschalige ijzersuppletie echter nog niet eerder getest. Net als in Boers et al. [7] is in Terra Nova gekozen voor een dosering van 100 g ijzer/m². Nieuw in het Terra Nova-experiment is niet alleen de

grootschaligheid van de proef, maar ook en vooral de geleidelijkheid van de ijzersuppletie: dit gebeurde door een windmolen over een periode van 1,5 jaar. Het ijzer wordt geleidelijk toegevoegd in plaats van alles in één keer, om eventuele negatieve bijeffecten, zoals een pHdaling of hoge lokale ijzer- en chlorideconcentraties, te voorkomen. Het doel is een ijzer/fosfaat verhouding te bereiken die in elk geval hoger is dan 1 mol/mol [11], maar liefst hoger dan 10 mol/mol [10]. Dat voorkomt het vrijkomen van fosfaat uit de waterbodem naar de waterlaag. In de bodem wordt een totaal ijzer/fosforverhouding nagestreefd die hoger is dan 10 mol/mol [10].

Voorafgaande berekeningen suggereerden dat deze dosering van 100g ijzer/m² voldoende zou zijn om fosfaatnalevering tegen te gaan. Verder speelt de totaal ijzer/zwavel ratio een belangrijke rol. Een ratio groter dan 1 mol/mol voorkomt fosfaatnalevering [11]. Uiteindelijk is er minder ijzer gedoseerd dan gepland (33 g ijzer/m²) doordat de windmolen minder wind heeft gevangen dan verwacht.

Na een leerzame test in een afgesloten petgat in 2009 werd tussen mei 2010 en november 2011 de gehele plas behandeld. Vanaf een vast punt werd opgelost ijzerchloride in de plas gedoseerd met een mobiele doseerinstallatie op een ponton, die door een windmolen werd aangedreven (afbeelding 1). Op deze manier werd er weinig gedoseerd als er weinig wind en stroming was, waardoor lokaal hoge ijzer- en chlorideconcentraties vermeden werden. Het ijzer bleek een optimale vlok te vormen die langzaam bezonk en zich daardoor goed over de plas kon verspreiden. Bij ijsgang werd de dosering stopgezet. De robuuste en duurzame doseerinstallatie was gebaseerd op een veilig ontwerp. Er werd voorafgaand een risicoanalyse gemaakt om aan veiligheidseisen voor mens, natuur en milieu te voldoen. Voor een uitgebreide beschrijving van beide praktijkproeven verwijzen we naar het STOWA rapport [8].



Afbeelding 1. Mobile doseerinstallatie met windmolen (Foto: Michel Colin)

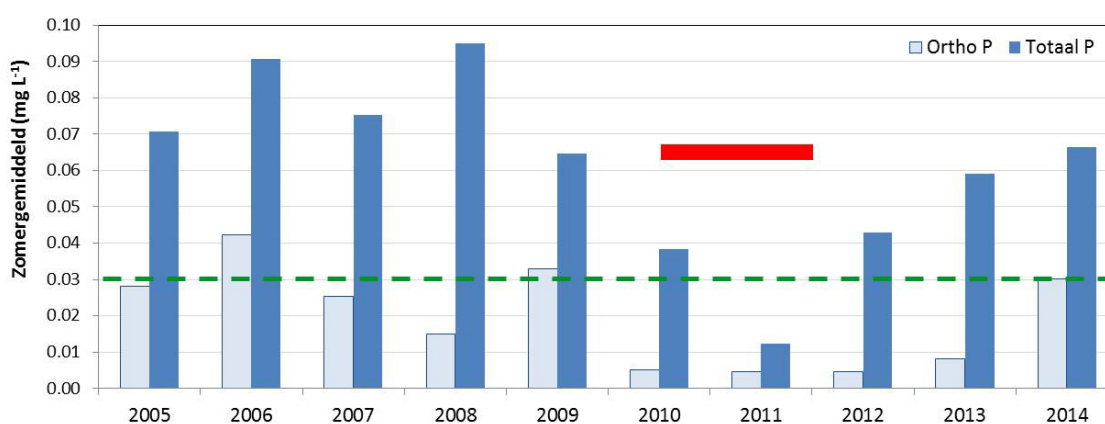
Om negatieve effecten op flora en fauna te voorkomen, werd tijdens de proef gestreefd naar een pH boven 6,5 in het oppervlaktewater. De geleidelijke dosering voorkwam een abrupte daling van de pH [6]. De gemiddelde pH tijdens de behandeling lag op 7,9 met een eenmalige uitschieter naar 6. De ijzerconcentratie mocht niet boven de norm van 6 mg/L uitkomen, omdat dit toxisch kan zijn voor aquatische organismen. Tijdens de ijzersuppletie zijn de ijzerconcentraties ruim binnen deze norm gebleven met een maximum van 0,7 mg/L in de waterkolom in september 2011. De KRW-grenswaarden voor chloride liggen bij 200 mg/L. Tijdens de ijzersuppletie gingen de concentraties omhoog naar maximaal 73 mg/L, wat ook ruim onder de norm is.

Door de geleidelijke dosering ontstond er geen dikke laag ijzernerslag, wat planten en benthische (op en in de bodem levende) organismen negatief kan beïnvloeden [6]. Er werden geen negatieve effecten van ijzer op vissen geconstateerd tijdens de jaarlijkse biomanipulatiemaatregelen. Het totaal aantal macrofaunataxa is tijdens de ijzersuppletie zelfs flink toegenomen, van 124 naar 157. Geleidelijke suppletie lijkt dus een milieu- en natuurvriendelijke methode om ijzer aan een meer toe te voegen.

Effecten op waterkwaliteit en algenbloei

Ortho-fosfaat en totaal fosfor

Tijdens de ijzersuppletie in Terra Nova daalden de concentraties aan ortho-fosfaat (PO₄) en totaal fosfor (TP) tijdelijk tot waarden beneden het gemiddelde van voorgaande jaren (afbeelding 2). In 2011 lag het zomergemiddelde van de TPconcentratie met 0,012 mg P/L onder de grenswaarde (Goed ecologisch potentieel, GEP) van 0,03 mg P/L [9], wat kenmerkend is voor een goede waterkwaliteit. Vanaf 2012 was er echter weer een toename van TP. Tijdens de zomer van 2014 waren de gemiddelde TP-concentraties weer vergelijkbaar met die van 2009 en namen ook de PO₄-concentraties weer toe.

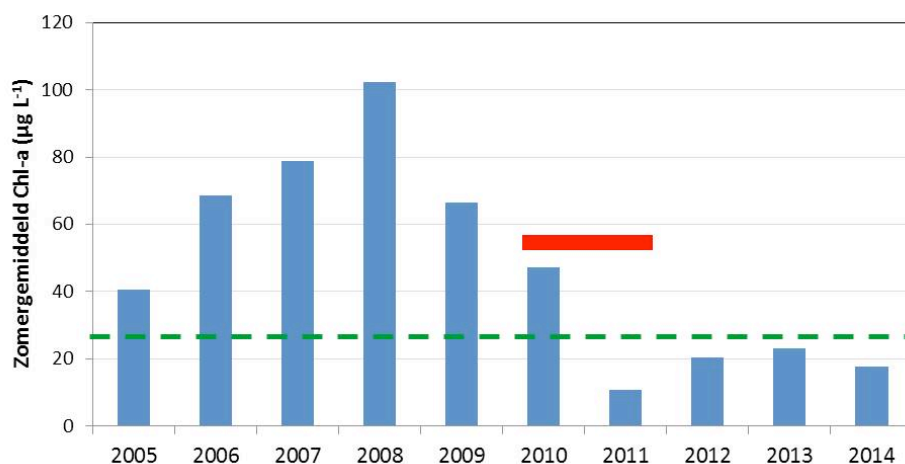


Afbeelding 2. Zomergemiddelde concentraties van totaal fosfaat (TP) en PO₄ (uitgedrukt in mg P/L) in Terra Nova in de periode 2005-2014

De rode balk markeert de periode van de ijzersuppletie; de groene lijn het GEP voor TP. Sinds 2012 is de toestand 'matig'.

Fytoplankton

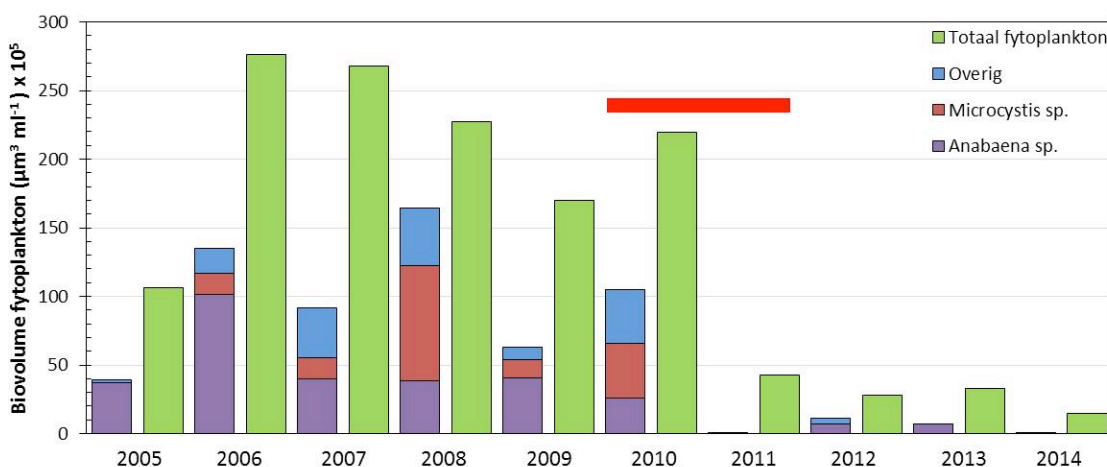
Fytoplankton, hierbij weergegeven als zomergemiddelde concentraties chlorofyl-a (Chl-a; afbeelding 3) en het zomergemiddelde biovolume aan blauwalgen (afbeelding 4), laat een duidelijke respons zien op ijzersuppletie. De Chl-a-concentraties daalden aanzienlijk sinds de start van de ijzersuppletie in 2010. Het grootste effect werd zichtbaar in het tweede jaar van de maatregel (2011), toen de concentraties daalden van 47 $\mu\text{g Chl-a/L}$ in 2010 tot 11 $\mu\text{g Chl-a/L}$ in 2011. In de daarop volgende twee jaren (2012-2013) werd weer een lichte toename in Chl-a gemeten, maar de gemeten waarden bleven aanzienlijk lager dan vóór de ijzersuppletie. Daarmee is de Chl-a-concentratie, na het stoppen van de ijzertoevoeging, al drie jaar fors lager dan de grenswaarde (GEP) van 25 $\mu\text{g Chl-a/L}$.



Afbeelding 3. Zomergemiddelde concentraties van Chl-a gemeten in Terra Nova tijdens de periode 2005 - 2014

De rode balk markeert de periode van de ijzersuppletie; de groene lijn het GEP voor Chl-a van 25 $\mu\text{g/L}$.

Evenals de gemeten Chl-a-waarden laat het biovolume van blauwalgen een flinke daling zien vanaf 2011, één jaar na de start van ijzersuppletie (afbeelding 4). In de daaropvolgende jaren blijft het gemeten biovolume laag. Ook in de samenstelling vindt een verschuiving plaats van



Afbeelding 4. Zomergemiddelde biovolumes van blauwalgen (*Anabaena sp.* (paars), *Microcystis sp.* (rood), en overige blauwalgen (blauw)) en het zomergemiddeld totaal biovolume fytoplankton (groen) in Terra Nova in de periode 2005 - 2014

De rode balk markeert de periode van de ijzersuppletie.

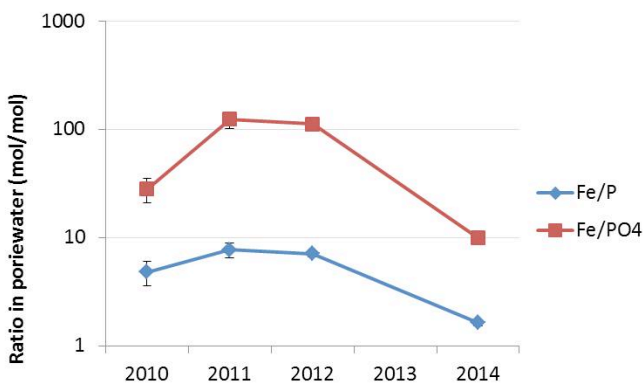
co-dominantie van *Microcystis* sp. en *Anabaena* sp. voor de start van ijzersuppletie naar een dominantie van *Anabaena* sp. zonder *Microcystis* sp. na de start van ijzersuppletie (afbeelding 4). Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat ook de stikstofconcentraties in Terra Nova laag zijn en dat stikstof-fixeerders, zoals *Anabaena* sp., onder deze condities in het voordeel hebben zijn ten opzichte van andere blauwalgen zoals *Microcystis* sp. De gemeten biovolumes zijn echter te laag om van een blauwalgenbloei te spreken.

Zwevend stof en opgelost organisch koolstof

De concentratie zwevend stof (inclusief de algen) nam sinds 2010 af en bleef lager dan 15 mg/L. De concentratie opgelost organisch koolstof (DOC) in het oppervlaktewater daalde van maximaal 15-20 mg/L tussen 2005 en 2010 tot maximaal 10 mg/L in 2011, wat waarschijnlijk veroorzaakt werd door binding aan ijzer [3]. Door deze afnames werd het water nog helderder.

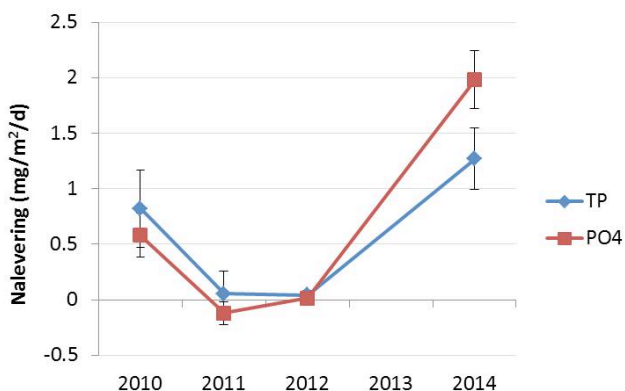
Effecten op nalevering uit de waterbodem

Ijzersuppletie heeft geleid tot de gewenste verhoging van de ijzerconcentraties in het poriewater in de bovenste centimeters van het sediment. Deze zijn verdubbeld in het eerste jaar van de toepassing en verdriedubbeld in het tweede jaar tot 150 $\mu\text{mol/L}$ (8,4 mg/L). Als gevolg hiervan is de ijzer/fosfaatratio in het poriewater gestegen tot boven de 100 mol/mol (afbeelding 5). Uit naleverings-experimenten met intacte sedimentkernen van 2 locaties in de plas (afbeelding 6) blijkt dan ook dat de nalevering van PO_4 en TP daardoor veel lager is tijdens en na de ijzersuppletie (2011 en 2012) dan vóór de ijzersuppletie (in 2010).



Afbeelding 5. Verloop van de ijzer/fosforratio (Fe/P) en ijzer/fosfaatratio (Fe/PO₄) in het poriewater in de bovenste centimeters van het sediment tussen 2010 en 2014

De foutenbalken geven de standaardfout weer. Let op de logaritmische schaal.



Afbeelding 6. Verloop van de experimenteel bepaalde naleveringssnelheden naar de waterlaag tussen 2010 en 2014

De foutenbalken geven de standaardfout weer.

Drie jaar na de beëindiging van de ijzersuppletie is de nalevering van PO₄ en TP sterk toegenomen, tot meer dan 1 mg/m²/dag (afbeelding 6), wat ook de toename van PO₄ en TP in het oppervlaktewater kan verklaren (afbeelding 2). Deze hoge nalevering blijkt te worden veroorzaakt door een toename van de PO₄ en TPconcentraties in het poriewater, waardoor de ijzer/fosfaatratio een stuk ongunstiger is geworden (afbeelding 5). De ijzerconcentraties in de toplaag zijn op hetzelfde niveau gebleven.

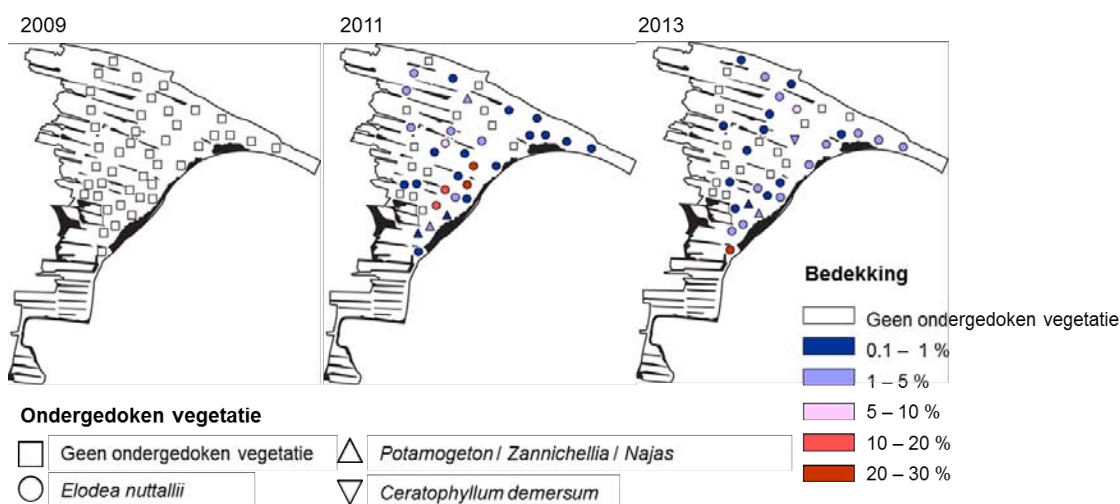
In de bodem is de totaalijzer/-zwavelratio niet veranderd. Deze ligt nog steeds tussen 0,5 en 1 mol/mol, wat net hoog genoeg is om sulfide te binden, maar niet hoog genoeg (> 1 mol/mol) om fosfaatnalevering te voorkomen [11]. Positief is wel dat de totaalijzer/fosforratio in de bodem verdubbeld is tussen 2010 en 2014 (van 7 naar 14 mol/mol) en nu boven de streefwaarde van 10 mol/mol uitkomt [10].

Ook biologische processen kunnen ten grondslag liggen aan de hoge fosfaatnalevering. Zo nemen ondergedoken waterplanten fosfaat op uit de bodem (ook ijzergebonden fosfaat), wat vrijkomt in het oppervlaktewater als de planten afsterven [12]. Daarnaast kunnen benthische draadalg fosfaat mobiliseren uit de waterbodem [13]. Doordat de monstername in 2014 in een ander seizoen heeft plaatsgevonden dan de andere jaren (september i.p.v. april), kan het mobiliseren van fosfaat door de vegetatie mogelijk de verhoogde nalevering en fosfaatconcentraties verklaren. In dichte vegetaties kunnen bovendien zuurstofloze omstandigheden ontstaan, waardoor de fosfaatnalevering direct wordt gestimuleerd. Ten slotte kan ook bioturbatie (het verstoren en omwoelen van de bodem) ervoor zorgen dat ijzer door de bodem gemengd wordt, waardoor het ijzerlaagje in de toplaag van het sediment langzaam verdwijnt.

Effecten op vegetatieontwikkeling

Voorafgaand aan de praktijkproef werd in verschillende laboratoriumexperimenten onderzocht of ijzer schadelijke effecten zou kunnen hebben op de kieming, groei en overleving van ondergedoken waterplanten. Hieruit bleek dat ijzerdoseringen tot 85 g ijzer/m² geen effect hadden op de overleving en groei van *Eloдея nuttalli*, *Potamogeton pectinatus*, *Myriophyllum spicatum*, *Chara virgata* en *C. globularis* [14, 15, 16]. Alleen de groei van *P. pectinatus* en *C. globularis* werd enigszins geremd. Gezien de gespreide dosering over tijd en ruimte in het veld (anders dan in de laboratoriumexperimenten) was de verwachting dat in de praktijkproef geen remming van de groei zou optreden. Uit vegetatieopnames in de zomer van 2011 blijkt dat de ijzersuppletie tot een terugkeer van ondergedoken waterplanten leidde op 70% van de opnamepunten, terwijl deze in 2009 nog compleet afwezig waren (afbeelding 7). Lokaal werden zelfs bedekkingen gehaald van > 20%. De vegetatie bestond voornamelijk uit de eutrofe soort *E. nuttalli*, maar in mindere mate ook uit meer mesotrofe soorten als *P. obtusifolius* en *Najas marina*. Sinds 2011 zijn de bedekkingen en soortensamenstelling vrijwel gelijk gebleven. Mogelijk is het uitblijven van een verdere verhoging van de bedekkingsgraad en diversiteit te wijten aan grote dichtheden rode Amerikaanse rivierkreeften [16]. De aanwezigheid van deze invasieve soort kan belemmeren dat er een stabiel, helder, door

waterplanten gedomineerd systeem ontstaat. Daarnaast kan vraat door de vele zwanen en meerkoeten ook de waterplantenontwikkeling vertragen.



Afbeelding 7. Bedekking met ondergedoken vegetatie op 43 opnamepunten in Terra Nova in 2009, 2011 en 2013

Conclusies

De praktijkproef met ijzersuppletie in de laagveenplas Terra Nova is tot nu toe succesvol gebleken: de plas is al vier jaar helder, zonder blauwalgenbloei en met een behoorlijke ontwikkeling van ondergedoken waterplanten. De diversiteit van de vegetatie laat nog wel te wensen over, omdat de plas vooral gedomineerd is door *Elodea nuttallii*. De TP-concentratie in het oppervlaktewater is na het stoppen van de ijzersuppletie weer snel toegenomen. Inmiddels is na vier jaar ook de orthofosfaatconcentratie weer gestegen en is de fosfaatnalevering uit de waterbodem in 2014 sterk toegenomen ten opzichte van de jaren daarvoor. Dat kan er op wijzen dat 33 g ijzer/m² onvoldoende was om langdurig fosfor in de bodem te binden in een plas met een sliblaag van 37 cm dik. De oorspronkelijk geplande 100 g/m² was beter geweest.

Ondanks de onzekerheden biedt ijzersuppletie kosteneffectieve kansen om de fosfaatnalevering in een laagveenplas te bestrijden en te voldoen aan de KRW-normen. Waterbeheer is een complex vak en vraagt aandacht voor verschillende mechanismen. Of ijzersuppletie een geschikte maatregel is hangt af van veel factoren. Zo verwachten we dat ijzersuppletie kansrijker is in waterlichamen met zandbodems, omdat deze doorgaans nutriëntenarmer en zuurstofrijker zijn dan veenbodems. Door de grotere beschikbaarheid van organisch materiaal worden ijzercomplexen gevormd, waardoor het fosfaatbindend vermogen afneemt. Verder wordt er sneller slib gevormd in veenplassen. Opwerveling van dit slib door bodemwoelende vissen belemmert de waterplantenontwikkeling. Essentieel voor een succesvolle toepassing van ijzersuppletie is bovendien dat de externe belasting laag genoeg is. Systeemkennis en procesbegrip zijn dan ook de onmisbare ingrediënten voor duurzaam en kosteneffectief waterbeheer.

Referenties

1. Schep, S. A., 2010. Ecologische modellering Loenderveense Plas en Terra Nova. Deventer: Witteveen+Bos; LN4-1.
2. Brouwer, E. & Smolders, A. P. J., 2006. Nutriëntenhuishouding in de veenplas Terra Nova en mogelijkheden tot herstel. Nijmegen: B-ware; 2006; Rapport nummer 2006.01.
3. Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M., Lucassen, E.C.H.E.T., Van der Velde, G., Roelofs, J.G.M., 2006. Internal eutrophication: How it works and what to do about it – A review. *Chemistry and Ecology* 22, 93-111.
4. Ter Heerdt, G. N. J. & Hootsmans, M., 2007. Why biomanipulation can be effective in peaty lakes. *Hydrobiologia*. 585:305-316.
5. Van de Haterd, R. J. W. & Ter Heerdt, G. N. J., 2007. Potential for the development of submerged macrophytes in eutrophicated shallow lakes after restoration measures. *Hydrobiologia*. 584:277-290.
6. Immers, A.K., 2014. Preventing or predicting cyanobacterial blooms - Iron addition as a whole lake restoration tool. Proefschrift. Universiteit van Utrecht. Utrecht.
7. Boers, P.; van der Does, J.; Quaak, M., & van der Vlugt, J., 1994. Phosphorus fixation with iron(III)chloride: A new method to combat internal phosphorus loading in shallow lakes? *Archiv Für Hydrobiologie*. 129:339-351.
8. Ter Heerdt, G.N.J., Geurts, J.J.M., Immers, A.K., Colin, M.G., Olijhoek, P.J.S., Yedema, E.S.E., Baars, E.T., Voort, J.W., 2012. IJzersuppletie in Laagveenplassen: De resultaten. STOWA-rapport 2012 – 43.
9. Factsheet OW 11 Hoogheemschap Amstel, Gooi en Vecht: NL11_5_4 Terra Nova, Waterkwaliteitsportaal. December 2014. www.waterkwaliteitsportaal.nl/Factsheets/Mei2014Publiek/Oppervlaktewater/factsheet_OW_11_Hoogheemraadschap_Amstel_Gooi_en_Vecht-2014-05-08-19-09-31.pdf
10. Geurts, J.J.M., Smolders, A.J.P., Verhoeven, J.T.A., Roelofs, J.G.M., & Lamers, L.P.M. (2008). Sediment Fe:PO₄ ratio as a diagnostic and prognostic tool for the restoration of macrophyte biodiversity in fen waters. *Freshwater Biology*, 53, 2101-2116.
11. Smolders A.J.P., Van Diggelen J.H.M., Geurts J.J.M., Poelen M.D.M., Roelofs J.G.M., Lucassen E.C.H.E.T., Lamers L.P.M., 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied: De complexe interacties tussen oever, waterbodem en oppervlaktewater. *Landschap* 30(3): 145-153.
12. Lamers, L.P.M., Schep, S., Geurts, J.J.M., Smolders A.J.P., 2012. Erfenis fosfaatrijk verleden: helder water met woekerende waterplanten. *H2O*. 44(13):29-31.
13. Barbiero, R.P. & Welch, E.B., 1992. Contribution of benthic blue-green-algal recruitment to lake populations and phosphorus translocation. *Freshwater Biology* 27, 249-260.
14. Immers, A.K., Van der Sande, M.T., Van der Zande, R.M., Geurts, J.J.M., Van Donk, E., Bakker, E.S., 2013. Iron addition as a shallow lake restoration measure: impacts on charophyte growth. *Hydrobiologia* 710, 241-251.

15. Immers, A.K., Vendrig, K., Ibelings, B.W., Van Donk, E., Ter Heerdt, G.N.J., Geurts, J.J.M., Bakker, E.S., 2014. Iron addition as a measure to restore water quality: implications for macrophyte growth. *Aquatic Botany* 116, 44-52.
16. Van der Wal, J.E.M., Dorenbosch, M., Immers, A.K., Vidal Forteza, C., Geurts, J.J.M., Peeters, E.T.H.M., Koese, B., Bakker, E.S., 2013. Invasive crayfish threaten the development of submerged macrophytes in lake restoration. *PLoS One* 8, e78579. doi: 10.1371/journal.pone.0078579.