

bodemonderzoek ontwikkeling Zuydoever



Niets uit dit rapport mag worden gereproduceerd, opnieuw vastgelegd, vermenigvuldigd of uitgegeven door middel van druk, fotokopie, microfilm, langs elektronische of elektromagnetische weg of op welke andere wijze dan ook zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.

Titel rapport:
bodemonderzoek ontwikkeling Zuydoever

Auteurs:
Fons Smolders & Moni Poelen

Opdrachtgever:
Zuydoever Ontwikkeling B.V.

Rapportnummer:
RP-22.152.22.105

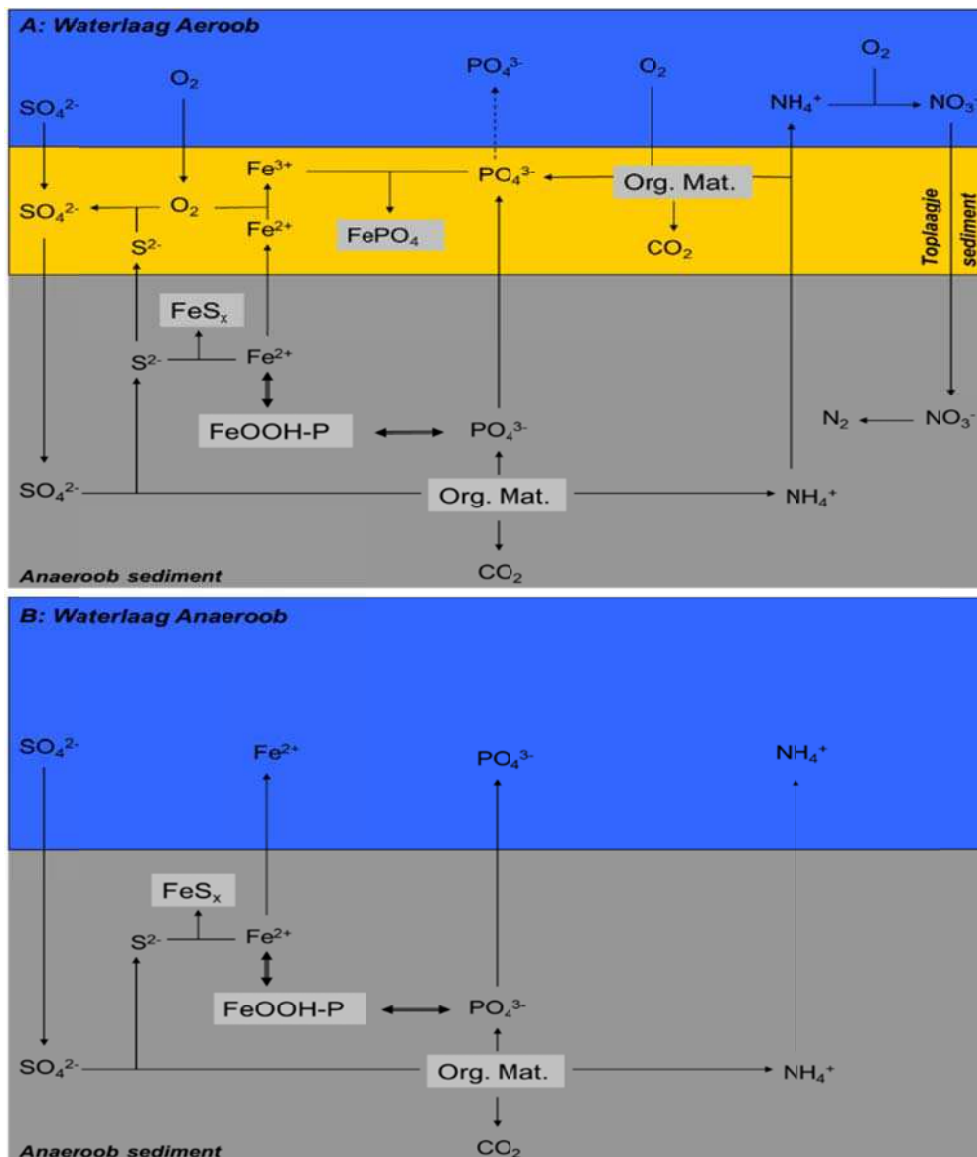
Contactgegevens:

Onderzoekcentrum B-WARE BV
Radboud Universiteit Nijmegen
Mercator III, Toernooiveld 1
6525 ED Nijmegen

Contactpersoon:
Fons Smolders
Tel: 06-52087507
A.Smolders@b-ware.eu
www.b-ware.eu

© Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen, 2022.

Hoge ijzerconcentraties in het bodemwater gaan, zolang de waterlaag voldoende zuurstof bevat, de nalevering van fosfaat naar de waterlaag tegen. Dit heeft te maken met het feit dat relatief goed oplosbaar gereduceerd ijzer (Fe^{2+}) in het geoxideerde toplaagje van het sediment wordt geoxideerd tot slecht oplosbaar Fe^{3+} . Dit Fe^{3+} kan in de bodem samen met fosfaat neerslaan als ijzerfosfaat of als slecht oplosbaar ijzer(III)(hydr)oxide waaraan fosfaat kan adsorberen (de “ijzerval”) (figuur 2). Zolang er dus voldoende gereduceerd ijzer in oplossing is in het bodemwater, en de waterlaag voldoende zuurstof bevat, zal de nalevering van fosfaat naar de waterlaag beperkt zijn. Wanneer door een toename van de sulfaatreductie, de ijzerconcentraties van het bodemwater dalen en/of de fosfaatconcentraties stijgen, kan er op een gegeven moment onvoldoende ijzer in het toplaagje voorhanden zijn om het fosfaat te binden. Hierdoor zal de nalevering van fosfaat naar de waterlaag toenemen (Smolders et al., 2001; Geurts et al., 2010, figuur 2).



Figuur 2: Interacties tussen de zwavel-, ijzer- en fosforkringloop in wateren met een zuurstofhoudende waterlaag (A) en wateren met een zuurstofarme waterlaag (B). In oranje is het geoxideerde toplaagje van de onderwaterbodem (het sediment) weergegeven. Dit laagje is meestal maar enkele millimeters dik.

De ijzerval kan functioneren zolang er voldoende zuurstof in de waterlaag boven de onderwaterbodem aanwezig is. Wanneer de waterlaag zuurstofarm wordt (met name in stagnant water), kan het ijzer niet meer worden geoxideerd en zal fosfaat samen met het ijzer naar de waterlaag diffunderen. Dit gebeurt met name in de zomermaanden wanneer het warm is, en er veel reactief organisch materiaal, dode algen en plantenresten in de toplaag aanwezig zijn. De hoge microbiële activiteit kan er dan, samen met het feit dat er in warmer water minder zuurstof kan oplossen, voor zorgen dat de zuurstofconcentratie in de waterlaag sterk daalt.

Zolang de waterlaag aerob is, is de ratio tussen de ijzer- en de fosforconcentratie van het bodemwater dus bepalend voor de mate van fosfor nalevering uit de waterbodem naar de waterlaag. De nalevering uit het sediment neemt toe bij toenemende P concentraties van het bodemwater. Smolders et al. (2001) vonden, gebaseerd op een naleveringsexperiment, een toename van de nalevering van P naar de waterlaag bij een Fe/P ratio lager dan 5 en vonden dat de nalevering van fosfaat uit het sediment fors toeneemt bij een Fe/P ratio in het bodemwater lager 1 (mol/mol). Ook Geurts et al. (2010) vonden in naleveringsproeven een grenswaarde van 1 (mol/mol) waaronder de P nalevering fors toeneemt.

Als vuistregel kunnen we hanteren dat bij een Fe/P ratio hoger dan 1 de bodem waarschijnlijk vooral fosfor zal naleveren wanneer de toplaag van de bodem anaëroob wordt. Onder anaërobe omstandigheden heeft de Fe/P ratio namelijk geen invloed meer op de nalevering, omdat de ijzerval dan niet meer werkt.

De mate waarin de belasting met sulfaat leidt tot eutrofiëring van het oppervlaktewater hangt sterk af van de verhouding tussen de ijzer- en de zwavelvoorraad (totaal-ijzer/totaal-zwavel ratio) van de bodem. Er kan met enige zekerheid gezegd worden dat onderwaterbodems met een totaal-Fe/totaal-S ratio hoger dan 1 worden gekenmerkt door een hoge Fe/P ratio van het bodemwater waardoor deze geen P naleveren zolang de waterlaag zuurstofhoudend is. Bodems met een totaal-Fe/totaal-S ratio lager dan 0,5 daarentegen zullen vrijwel altijd P naleveren. Waarschijnlijk hangt de variatie tussen gebieden af van de vorm waarin het zwavel voorkomt in de bodem; als organisch zwavel, FeS of FeS₂ (Smolders et al., 2013).

Bij de anaërobe afbraak van organisch materiaal in de onderwaterbodem komt ook ammonium vrij. Deels wordt dit gebonden aan het bodemadsorptiecomplex en deels is dit ammonium ook in opgeloste vorm in de onderwaterbodem aanwezig. Dit opgeloste ammonium kan vrij naar de waterlaag diffunderen waar het kan worden geoxideerd tot nitraat (nitrificatie). Het nitraat uit de waterlaag kan in de anaërobe onderwaterbodems weer worden gedenitrificeerd tot stikstofgas (N₂) of lachgas (N₂O) waarna het verdwijnt uit het systeem. Nitrificatie en denitrificatie zijn microbiële processen die in de winter langzaam verlopen. Dit is de reden waarom de concentraties ammonium en nitraat in de winter kunnen ophopen in de waterlaag, terwijl ze in de zomermaanden meestal erg laag zijn. Behalve deze microbiële processen speelt ook opname door diatomeeën, algen en waterplanten in het groeiseizoen een rol bij de lage stikstofconcentraties in de zomer. Wanneer de waterlaag anaëroob wordt kan er geen nitrificatie van ammonium meer plaatsvinden en kan ook in de zomer ammonium accumuleren in de waterlaag.

2 METHODE

2.1 Veldwerkzaamheden en uitgevoerde analyses

De bodems werden verzameld door FUGRO en afgeleverd bij Onderzoekcentrum B-WARE. Hierbij werden in 5 toekomstige watergangen bodemmonsters verzameld op een diepte van 240 tot 250 cm -NAP (de voorziene toekomstige waterbodem). Per watergang werden 5 handboringen gezet. De bodem van twee van deze handboringen werden gemengd in emmertjes en luchtdicht afgesloten. Dit resulteerde in 5 bodemmonsters (per watergang één mengmonster). In tabel 1 wordt aangegeven waar de verschillende bodems exact zijn verzameld.

Tabel 1: Exacte locaties waar de bodems vandaan komen die in dit onderzoek zijn geanalyseerd. Per watergang wordt aangegeven waar de handboringen zijn gezet waarvan de twee bodemmonsters zijn gemengd.

Watergang	Handboring	X	Y
WG1	HB4	130304,835	468377,129
WG1	HB5	130306,953	468403,661
WG2	HB2	130370,999	468406,690
WG2	HB3	130368,280	468381,048
WG3	HB1	130394,851	468343,441
WG3	HB2	130430,600	468389,326
WG4	HB2	130486,767	468377,817
WG4	HB4	130467,485	468338,173
WG5	HB2	130542,574	468363,470
WG5	HB3	130538,085	468323,506

Uit de emmertjes werd poriewater verzameld waarna aan de bodems een aantal aanvullende analyses werd uitgevoerd:

Op de monsters werden de volgende fysisch-chemische analyses verricht:

Bodem:

- Organisch stof en bodemdichtheid bepaling;
- Totale (verweerbare) elementconcentraties door middel van een bodemdestructie
- Oxalaat extraheerbaar ijzer, aluminium en fosfor door middel van een oxalaatextractie.

Bodemvocht

- Element- en nutriëntenconcentraties in het bodemvocht van de bodem

2.2 Waterbodem- en poriewateranalyses

Poriewater:

De pH werd gemeten met een standaard Ag/AgCl₂ elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type TIM840). De hoeveelheid opgelost anorganisch koolstof (TIC: CO₂ en HCO₃) werd bepaald met behulp van infrarood gas analyse (ABB Advance Optima IRGA). De alkaliniteit werd bepaald door een deel van het monster te titreren met 0,01 mol l⁻¹ zoutzuur tot pH 4,2. De toegevoegde hoeveelheid equivalenten zuur per liter is hierbij de alkaliniteit. De EGV werd bepaald met een HACH EGV-probe verbonden met een HQD-meter. Een deel van het bodemvocht werd gefixeerd met een 4% HCl-oplossing. De monsters voor de auto-analyzer werden bewaard bij een temperatuur van -20 °C tot aan de analyse. De monsters voor de ICP-OES werden aangezuurd voor analyse en bewaard bij 4 °C.

Waterbodem:

Een bekend volume van de sedimentmonsters werd gedroogd waarna het vochtgehalte en het massa volume (kilogram droge stof per liter bodemvolume) wordt berekend. Van het gedroogde monster werd een deel verast/uitgegloeid (gedurende 5 uur bij 550 °C). Uit de afname van de massa tijdens verassen (gloeiverlies) werd het organisch stofgehalte berekend.

Van het gedroogde monster werd een deel ontsloten met geconcentreerd salpeterzuur en waterstofperoxide in een gesloten destructiemagnetron. Hierbij wordt de verweerbare fractie aan elementen van een bodem vrijgemaakt. Het destruktaat werd doorverdund waarna de concentraties fosfor (P), calcium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), ijzer (Fe), mangaan (Mn), zwavel (S), silicium (Si) en aluminium (Al) werden bepaald met een ICP.

Oxalaatextractie:

Met een oxalaatextractie kan de hoeveelheid fosfaat worden gemeten die gebonden is aan amorfe ijzer- en aluminium(hydr)oxiden. De verhouding hiertussen is tevens een maat voor de fosfaatverzadiging van de bodem. Hiervoor werd vers materiaal ingewogen overeenkomstig met 2,5 gram droog materiaal en met 50 ml extractiemedium ((COONH₄)₂.H₂O: 0,12 mol l⁻¹ en H₂C₂O₄: 0,12 mol l⁻¹) uitgeschud op een schudmachine bij 105 rpm. De extracten werden gefilterd met behulp van rhizons en het filtraat werd niet-aangezuurd bewaard bij 4 °C tot verdere analyse op de ICP-OES.

Aan de hand van het oxalaatextract kan de theoretische fosfaatverzadigingsgraad (FVG) van de bodem worden bepaald: $FVG = 100 * P_{ox} / (0,5 * (Al_{ox} + Fe_{ox}))$.

2.3 Elementenanalyse (ICP en auto-analysers)

De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), ijzer (Fe), mangaan (Mn), fosfor (P), zwavel (S; als maat voor sulfaat), silicium (Si) en zink (Zn) werden bepaald met behulp van een Inductively Coupled Plasma Spectrofotometer (ICP-OES, ICAP 6300, Thermo Fisher Scientific of, ARCOS MV, Spectro). De concentraties nitraat (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) en fosfaat (PO₄³⁻) werden colorimetrisch bepaald met een Seal auto-analyser III met behulp van resp. salicylaatreagens, hydrazinesulfaat en ammoniummolybdaat/ascorbinezuur. Chloride (Cl⁻) werd colorimetrisch bepaald met een Bran+Luebbe auto-analyser III systeem met behulp van mercuritiocyanide. Natrium (Na⁺) en kalium (K⁺) werden vlamfotometrisch bepaald met een Sherwood Model 420 Flame Photometer.

3 RESULTATEN

3.1 Bodem

In tabel 2 worden de resultaten gegeven van de analyses aan de vaste bodems. De bodems van WG1 (watergang 1) en WG2 (watergang 2) hebben een lager vochtgehalte en lager organisch stofgehalte en een hoger massa volume (MV, kg droge stof per liter verse bodem). Deze bodems zijn kleiiger dan de overige bodems, wat ook blijkt uit de aluminium-, kalium- en magnesiumgehalten die voor deze bodems hoger zijn. Aluminium, kalium en magnesium komen in kleideeltjes in een vaste verhouding voor.

Voor deze kleiige bodems zijn ook de fosforgehaltes hoger. In deze bodem is dus relatief veel fosfor (P) aanwezig.

De oxalaatextracties laten zien dat de meer kleiige bodems (WG1 en WG2) en, in iets mindere mate, ook in WG3 een relatief groter deel van het aanwezig fosfor oxalaatextraheerbaar is. Dat wil zeggen dat een groot deel gebonden is aan amorfe aluminium- en ijzer(hydr)oxides die in deze bodem aanwezig zijn. Deze worden in een oxalaatextractie namelijk opgelost. De oxalaatextraheerbare P fractie is de fractie die relatief gemakkelijk vrijgemaakt kan worden als gevolg van redoxprocessen in de onderwaterbodem.

De fosfaatverzadigingsgraad (FVG) is ook het laagste voor de bodems WG4 en WG5. Bodems met een FVG <12,5 zijn over het algemeen heel goed in staat om fosfor in de bodem te binden waardoor de fosforconcentraties in het poriewater laag blijven. Bodems met een FVG hoger dan 25 zijn minder goed in staat om fosfor te binden en zijn in principe 'fosfaatverzadigd', waardoor fosforconcentraties in het poriewater relatief sterk kunnen oplopen.

Tabel 2: Resultaten van de analyses uitgevoerd aan de bodems. Vocht staat voor vochtgehalte, MV voor massa volume (kg droge stof per liter verse bodem) en OS voor organisch stofgehalte. Destructie staat voor de resultaten van de destructieanalyses (ontsluitingen met salpeterzuur en peroxide; 'totaalgehalten') in mmol per kilogram droge stof. De oxalaatextractie geeft de resultaten van de oxalaatextraheerbare fractie Fe, Al en P. FVG staat voor de fosfaatverzadiging2graad.

	%	kg/l	%	Destructie										
				mmol/kg										
	Vocht	MV	OS	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Zn
WG 1 HB-4 HB-5	71,9	0,308	32,4	721	198	1172	43,0	168,5	4,6	3,8	38,2	1157	5,4	1,7
WG 2 HB-2 HB-3	73,4	0,293	29,4	705	284	818	45,2	189,0	8,9	5,0	57,5	381	4,7	1,3
WG 3 HB-1 HB-2	78,5	0,222	54,5	388	316	741	19,2	96,7	3,6	3,2	22,5	871	3,1	0,5
WG 4 HB-2 HB-4	84,3	0,157	65,6	326	494	557	16,7	92,7	6,8	3,0	12,6	730	3,9	0,7
WG 5 HB-2 HB-3	83,9	0,165	57,8	482	446	515	23,4	106,4	5,2	3,6	17,6	651	6,3	0,8

	Oxalaatextractie			%
	mmol/kg			
	Al	Fe	P	FVG
WG 1 HB-4 HB-5	43,6	406	34,6	15,4
WG 2 HB-2 HB-3	57,2	304	41,5	23,0
WG 3 HB-1 HB-2	45,1	260	18,6	12,2
WG 4 HB-2 HB-4	62,8	160	2,5	2,3
WG 5 HB-2 HB-3	68,0	138	4,7	4,6

3.2 Poriewater

In tabel 3 worden concentraties in het uit de bodems geëxtraheerde poriewater gegeven. De fosforconcentraties in het poriewater zijn samen met de ijzerconcentratie van invloed op de nalevering van fosfor naar het oppervlaktewater (zie 1.2). Zolang er meer ijzer dan fosfor in het poriewater aanwezig is zal er geen nalevering plaatsvinden van fosfor naar de waterlaag. Dit komt omdat het gereduceerde ijzer op de overgang van onderwaterbodem naar waterlaag wordt geoxideerd. Hierbij ontstaan ijzer(hydr)oxides waaraan fosfor bindt (figuur 2). Wanneer er meer fosfor dan ijzer in het poriewater aanwezig is functioneert deze zogenaamde ijzerval niet meer waardoor het fosfor in de waterlaag kan komen waarbij waterkwaliteitsproblemen kunnen ontstaan. Ook wanneer het water boven de onderwaterbodem zuurstofarm wordt (met name in de zomermaanden) kan de ijzerval niet werken en vindt er nalevering plaats van fosfor naar de waterlaag.

Tabel 3: Resultaten van de analyses uitgevoerd aan het poriewater van de bodems. EGV staat elektrisch geleidingsvermogen. Alle resultaten worden gegeven in μmol per liter poriewater.

	Poriewater									
	pH	$\mu\text{s/cm}$				$\mu\text{mol/l}$				
		EGV	CO ₂	HCO ₃	NH ₄	P	Na	Cl	S	
WG 1 HB-4 HB-5	6,4	535	4331	4674	430	20,5	477	240	280	
WG 2 HB-2 HB-3	6,9	436	1293	3851	254	9,6	656	471	76	
WG 3 HB-1 HB-2	6,7	751	3523	6698	1233	4,0	638	497	481	
WG 4 HB-2 HB-4	6,4	341	3289	3501	38	3,8	357	206	40	
WG 5 HB-2 HB-3	6,1	497	4119	2004	468	1,8	381	259	68	

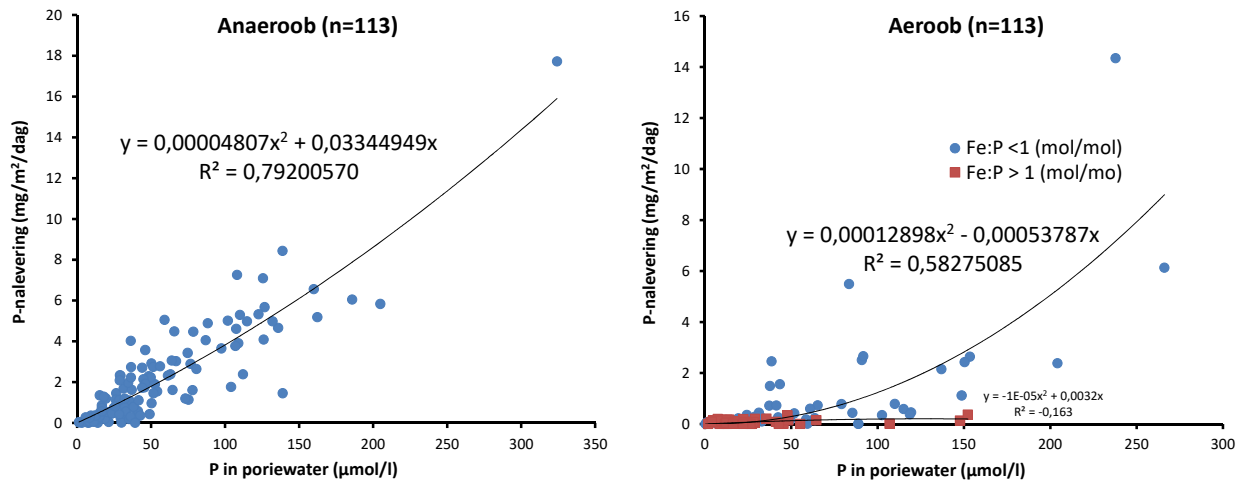
	$\mu\text{mol/l}$						
	Ca	Mg	K	Si	Fe	Mn	Zn
WG 1 HB-4 HB-5	1932	284	26,4	473	827	27,1	1,00
WG 2 HB-2 HB-3	1716	238	11,3	324	232	14,1	5,69
WG 3 HB-1 HB-2	2688	696	177,7	282	358	19,9	0,69
WG 4 HB-2 HB-4	1460	219	6,7	224	166	14,0	4,53
WG 5 HB-2 HB-3	2064	347	43,4	256	80	13,3	1,21

3.3 Inschatting nalevering

Omdat we weten dat de zuurstofconcentratie een grote invloed heeft op de nalevering, heeft Onderzoekcentrum B-WARE voor ruim honderd waterbodems naleveringsproeven uitgevoerd met een zuurstofverzadigde waterlaag en een zuurstofloze waterlaag. Hiermee kan het verschil tussen aerobe (met zuurstofrijke waterlaag) en anaerobe (zuurstofarme waterlaag) nalevering worden vastgesteld. Hierbij werd de gemeten nalevering voor deze bodems vergeleken met de in het lab gemeten P-concentratie in het poriewater.

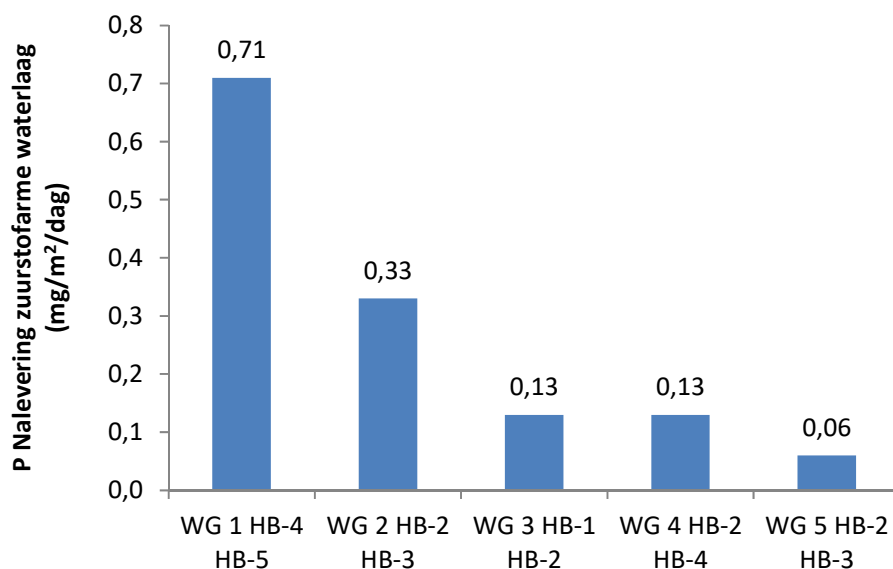
In figuur 3 worden de relaties tussen de nalevering en de gemeten P-concentraties in het poriewater gegeven. Voor de anaerobe incubaties is er een goed verband tussen de gemeten nalevering en de P-concentratie in het poriewater van de bodems. Er wordt daarbij geen effect gevonden van de ijzer/fosfor-ratio (Fe/P-ratio) van het poriewater op de P-nalevering. Bij P-concentraties lager dan $50 \mu\text{mol/l}$ is er wel veel variatie in nalevering bij vergelijkbare P-concentraties in het poriewater van de waterbodems en is een uit het mathematische verband berekende nalevering dus minder betrouwbaar.

Bij een zuurstofrijke waterlaag meten we veel lagere naleveringen van P naar de waterlaag (Figuur , rechts), waarbij zoals verwacht bij een Fe/P-ratio hoger dan 1 de nalevering bijna altijd heel laag is.



Figuur 3. Relatie tussen de P-concentratie in het poriewater en de P-nalevering bij een zuurstofloze (links) en zuurstofhoudende (rechts) waterlaag. In de figuren is onderscheid gemaakt tussen een Fe/P-ratio in het poriewater lager en hoger dan 1.

Dit komt omdat in het oxidatieve toplaagje tussen water en sediment het opgeloste gereduceerde ijzer weer wordt geoxideerd waardoor fosfaat wordt gebonden aan de gevormde ijzer(hydr)oxides en/of ijzer en fosfaat gezamenlijk neerslaan als $FePO_4$ in de toplaag. Als gevolg hiervan wordt de nalevering van P naar de waterlaag beperkt zolang de Fe/P-ratio in het poriewater voldoende hoog is ($>>1$) en zolang de waterlaag aeroob (zuurstofrijk) is.



Figuur 4: De op grond van de fosforconcentratie in het poriewater berekende nalevering bij een zuurstofarme waterlaag.

Hoewel het daadwerkelijk meten van de nalevering onder gecontroleerde aerobe en anaerobe omstandigheden het meest betrouwbare beeld geeft van de nalevering van een waterbodem, kunnen we de hierboven beschreven verbanden (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**) prima gebruiken om een inschatting te maken van de P-nalevering wanneer we alleen poriewatermetingen hebben. Hiervoor wordt de formule uit Figuur links gebruikt voor het berekenen van de anaerobe nalevering uit de fosforconcentratie in het poriewater van de bodem. De formule uit Figuur rechts wordt gebruikt voor het berekenen van de aerobe nalevering uit de fosforconcentratie in het poriewater van de bodem. Bij een Fe:P ratio in het poriewater >1 wordt aangenomen dat de nalevering naar een aerobe waterlaag 0 is.

Voor de bemonsterde bodems uit Zuydoever betekent dit een nalevering die, afhankelijk van de locatie, tussen 0,06 en 0,71 mg/m²/dag ligt (figuur 4), wanneer de waterlaag boven de onderwaterbodems zuurstof arm is. Wanneer de waterlaag zuurstof houdend is, is de nalevering steeds nihil omdat het poriewater steeds veel meer ijzer dan fosfor bevat.

4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op grond van de gemeten fosforconcentraties in het poriewater en de fosfaatverzadigingsgraad van de bodems zullen de bodems WG4 en WG5 de minste nalevering van fosfor naar de waterlaag laten zien. Dit zijn tevens de twee meest organische bodems. De nalevering uit deze bodems zal dus relatief laag zijn. De bodem WG3 heeft een iets hogere fosfaatverzadigingsgraad met een nog steeds lage fosforconcentratie in het poriewater. De venige kleibodems WG1 en WG 2 hebben de hoogste fosfaatverzadigingsgraden en fosforconcentraties in het poriewater. Voor deze bodems is de kans op nalevering van fosfor naar de waterlaag het grootst, maar alleen wanneer de waterlaag (tijdelijk) zuurstofarm wordt.

Op korte termijn zal de nalevering van fosfor naar de waterlaag dus laag zijn voor alle bodems zolang de waterlaag zuurstofhoudend is. Bij een zuurstofarme waterlaag zullen met name de bodems WG1 en WG2 fosfor naleveren naar de waterlaag.

Wanneer de bodems als waterbodem gaan dienen zijn er een paar aandachtspunten. Ten eerste is het belangrijk dat er voldoende doorstroming is van het oppervlaktewater zodat de kans op zuurstofarm water klein(er) is. Omdat het in alle gevallen gaat om bodems met een hoog organisch stofgehalte (veenbodems of venige kleibodems (WG1 en WG2)) bestaat er echter ook het risico dat deze gaan oxideren wanneer ze aan zuurstofrijk oppervlaktewater worden blootgesteld. Hierdoor wordt de organische bodem afgebroken en kunnen op langere termijn toch weer voedingstoffen vrijkomen. Bovendien kan er een laagje slib ontstaan, bestaande uit geoxideerd veen, waardoor het water troebel kan worden door opwerveling van deze slibdeeltjes. Tevens wordt hierdoor het zuurstof uit het oppervlaktewater verbruikt waardoor in de zomer zuurstofloosheid kan ontstaan. Iets dieper in de waterbodem kan sulfaat worden gereduceerd tot sulfide waardoor de binding van fosfor aan ijzer kan afnemen in de loop van de tijd (zie paragraaf 1.2). Hierdoor kan de fosfaatverzadiging en de concentratie van fosfor in het poriewater toenemen in de loop van de tijd. Met name wanneer het oppervlaktewater veel sulfaat bevat.

Wij adviseren dan ook om de veenbodems af te dekken met een laagje (schoon, fosfor-arm) zand of een laagje afdichtende schone klei met hierop een laagje zand. Hierdoor staan de bodems niet direct in contact met de waterlaag en is de kans het grootste dat de waterbodems ook op de langere termijn niet voor waterkwaliteitsproblemen gaan zorgen.

5 LITERATUUR

- Geurts J.J.M., A.J.P. Smolders, A.M. Banach, J.P.M. Van de Graaf, J.G.M. Roelofs & L.P.M. Lamers, 2010. The interaction between decomposition, net N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens. *Water Research* 40: 3487-3495.
- Lamers L.P.M., H.B.M. Tomassen & J.G.M. Roelofs, 1998. Sulfate induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. *Environmental Science & Technology* 32: 199-205.
- Lamers, L.P.M., L.L. Govers, I.C.J.M. Janssen, J.J.M. Geurts, M.E.W. Van der Welle, M.M. Van Katwijk, T. Van der Heide, J.G.M. Roelofs & A.J.P. Smolders, 2013. Sulfide as a soil phytotoxin - a review. *Frontiers in Plant Science* (2013) 4: 268.
- Smolders AJP, Lamers LPM, Moonen M, Zwaga K, Roelofs JGM, 2001. Controlling phosphate release from phosphate-enriched sediments by adding various iron compounds. *Biogeochemistry* 54: 219-228.
- Smolders A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen, G. Van der Velde & J.G.M. Roelofs, 2006. Internal eutrophication: 'How it works and what to do about it', a review. *Chemistry and Ecology* 22: 93-111.
- Smolders, A.J.P., J.M.H. van Diggelen, J.J.M. Geurts, M.D.M. Poelen, & , 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied. De complex interacties tussen oever, waterbodembodem en het oppervlaktewater. *Landschap* (2013) 30: 145-153.