



Uniek verschijnsel in de Groene Waterparel

Katteklei in de bodem leidt tot vegetaties van Oeverkruid-klasse in boerensloten

In de Groene Waterparel, gelegen in de Zuidplaspolder (Zuid-Holland), doet zich een bijzonder fenomeen voor. Terwijl de gemiddelde 'boerensloot' wordt gekenmerkt door voedselrijk en gebufferd water, zijn hier boerensloten waarin plantensoorten uit de Oeverkruid-klasse (*Littorelletea*) dominant aanwezig zijn; soorten die kenmerkend zijn voor voedselarm en zuur tot zwak gebufferd water. Het geheim is de aanwezigheid van katteklei in de bodems. Door biogeochemische bodemprocessen en een gunstige hydrologie ontstaan in bepaalde sloten de juiste condities voor deze soorten. Nederland heeft slechts een relatief klein oppervlak aan gemeenschappen en soorten van de Oeverkruid-klasse, maar vanwege de centrale ligging een grote internationale verantwoordelijkheid voor de instandhouding. De kennis uit dit veldonderzoek biedt perspectieven voor behoud en ontwikkeling van deze vegetaties in polders met katteklei, zowel in Nederland als daarbuiten.

De Zuidplaspolder, een diepe droogmakerij tussen Rotterdam en Gouda, ontstond in de negentiende eeuw, toen de door intensieve veenwinning ontstane Zuidplas werd drooggelegd. In het zuidelijke deel van deze polder ligt de Groene Waterparel. De bodem van dit gebied bestaat voornamelijk uit veen, moerige gronden en kleigronden, waarbij plaatselijk katteklei voorkomt (Van den Broek *et al.*, 2016).

In het centrale deel van de Groene Waterparel komen in ieder geval sinds 1970 een aantal karakteristieke plantensoorten voor uit de Associatie van Vlottende bies en de Naaldwaterbies-associatie (Oeverkruid-klasse), waaronder naaldwaterbies (*Eleocharis acicularis*), vlottende bies (*Eleogiton fluitans*), kleinste egelskop (*Sparganium natans*), knolrus (*Juncus bulbosus*) en gewone waternavel (*Hydrocotyle vulgaris*) (Van der Goes, 2016); (zeldzame) soorten die indicatief zijn voor zure tot zwak gebufferde, voedselarme wateren en voornamelijk voorkomen in (heide)vennen, onderlopende slenken en (deels) geïsoleerde poelen op de hogere (pleistocene) zandgronden in Noord-Brabant en aangrenzend Midden-Limburg, de Veluwe, de Achterhoek, Twente en Drenthe/Oost-

Friesland (LNV, 2008). Ook worden deze vegetaties in de kustduinen van Noord- en Zuid Holland en de Wadden aangetroffen. Het voorkomen van deze soorten in de Zuidplaspolder is dan ook uniek en blijkt nauw samen te hangen met de aanwezigheid van katteklei in de bodems. De naam 'katteklei' wordt in verband gebracht met de geur, kleur en textuur van de bodems, die doet denken aan kattenpoep. Ook wordt de naam wel gezien als een verwijzing naar de activiteiten van heksen of katten, die men voor de verslechtering van de bodem verantwoordelijk hield.

Potentiële kattekleibodems ontstaan meestal in kustgebieden als gevolg van de reductie van sulfaat (SO_4^{2-}), waarbij sulfide (S^{2-}) vrijkomt dat wordt gebonden aan gereduceerd ijzer (Fe^{2+}). Hierdoor bevatten deze bodems veel ijzersulfiden, met name pyriet (FeS_2). Wanneer deze bodems worden blootgesteld aan zuurstof kan er door oxidatie van pyriet veel zwavelzuur (H_2SO_4) vrijkomen, samen met metalen waaronder ijzer en aluminium. Hierdoor ontstaat een zure onvruchtbare bodem: de zogenaamde kattekleibodem (Poelman, 1972; Singer, 2010). In kattekleibodems worden vaak gele vlekken

katteklei
pyriet
zwakgebufferde
vegetaties
Oeverkruid-klasse
Littorelletea

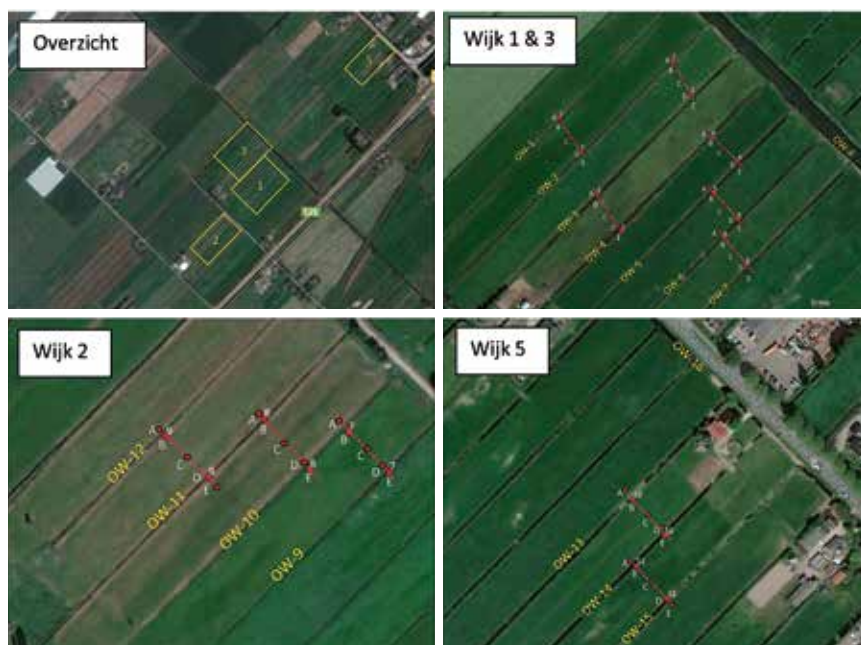
J.M.H. (Jose) van Diggelen
Onderzoekcentrum B-WARE
Nijmegen, Postbus 6558, 6503
GB Nijmegen
j.vanDiggelen@b-ware.eu

Y.J.M. (Yvon) Verstijnen
Onderzoekcentrum B-WARE

J.G.M (Jan) Roelofs
Onderzoekcentrum B-WARE

A.J.P. (Fons) Smolders
Onderzoekcentrum B-WARE &
Radboud Universiteit Nijmegen,
Aquatische Ecologie en
Milieubiologie

Foto: **Mark van Veen**
Boerensloot met bijzondere vegetatie in de Groene Waterparel (Zuidplaspolder).



Figuur 1 De deelgebieden (wijken) in de Groene Waterparel die zijn meegenomen in het veldonderzoek, ingericht met raaien van peilbuizen tussen de sloten voor de monitoring van grondwaterstanden en (grond) waterkwaliteit. De wijken zijn gekozen op basis van de meest dominante soort(en) aanwezig (Van der Goes & Groot, 2016): diverse doelsoorten waaronder knolrus & vlottende bies (wijk 1); vlottende bies (wijk 2); knolrus (wijk 3); geen doelsoorten maar wel o.a. fonteinkruiden (wijk 5).

Figure 1 Sub-areas in the Groene Waterparel that have been monitored during field research, by installing rows of piezometers between ditches to monitor groundwater tables. Porous cups were installed at 3 depths to extract groundwater for analyses. These sub-areas for research were selected based on the presence of dominant plant species (Van der Goes & Groot, 2016): different target species including *J. bulbosus* & *E. fluitans* (sub-area 1); *E. fluitans* (sub-area 2); *J. bulbosus* (sub-area 3); non-target species (sub-area 5).

aangetroffen die bestaan uit jarosiet (kaliumijzersulfaat). In de Zuidplaspolder veroorzaakt de complexe hydrologie daarbij een gunstige mate van isolatie en een indirecte aanvoer van extern oppervlaktewater naar de peilvakken.

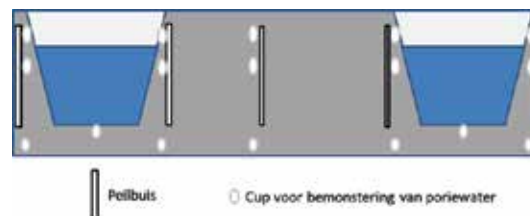
Dit artikel beschrijft de sturende processen in de katekleibodem, het grondwater en het oppervlaktewater in de sloten die leiden tot het voorkomen van deze voor het laagveen- en zeekleigebied bijzondere vegetaties.

Onderzoeksmethode

Voor het veldonderzoek werden in het gebied met kateklei (Van den Broek et al., 2016) vier 'wijken' geselecteerd: deelgebieden die verschillen in kwaliteit en samenstelling van de (doel)vegetaties in de sloten (Van der Goes, 2016). Zo is in wijk 2 vlottende bies dominant en in wijk 3 knolrus. In wijk 1 komen diverse doelsoorten gemengd voor, terwijl in wijk 5 sloten liggen waarin geen enkele doelsoort voorkomt, maar waar bijvoorbeeld wel glanzig fonteinkruid (*Potamogeton lucens*) en brede waterpest (*Elodea canadensis*) aanwezig zijn, die duiden op sterk gebufferd water. Monitoring van de wijken vond plaats van oktober 2018 tot en met oktober 2019. Per wijk werden drie of vier aangrenzende sloten geselecteerd, waartussen raaien met peilbuizen en poreuze cups (figuren 1 en 2) werden geplaatst om de hydrologie

Figuur 2 Positie van de poreuze cups (witte ellipsen) en peilbuizen (verticale staafjes) in de raaien.

Figure 2 Position the porous cups (white ellipses) and monitoring wells (vertical rods) in the rows.

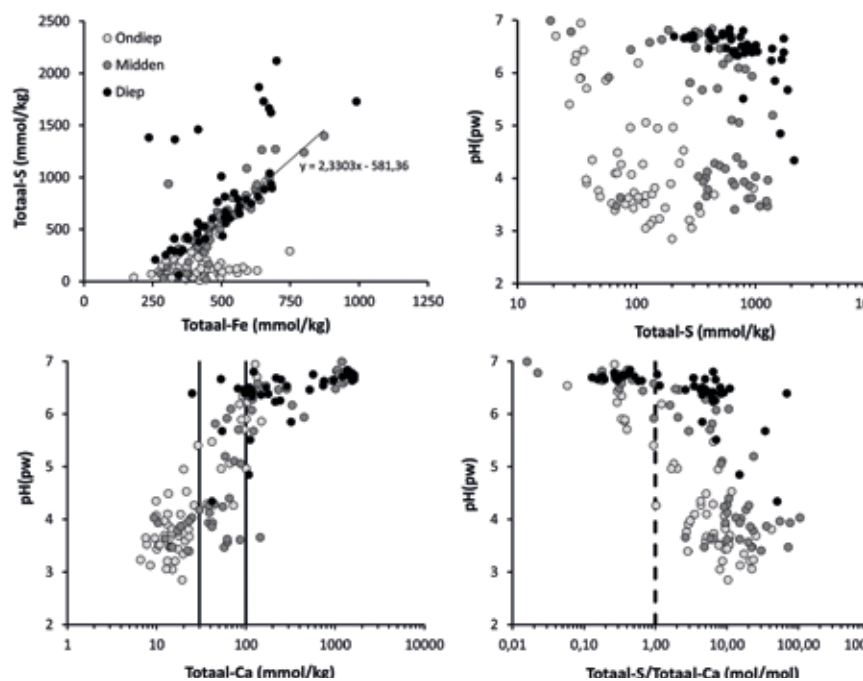


(waterstanden) in kaart te brengen. De peilbuizen werden geplaatst in het freatisch grondwater op een maximale diepte van gemiddeld 1,8 m onder maaiveld (met een filter van 1 m). Ook werd in iedere sloot een houten paal geslagen als peilschaal voor het oppervlaktewater. De grondwaterstanden in de peilbuizen en peilschalen werden eens per twee weken handmatig gemeten ten opzichte van maaiveld. Om deze waarden om te kunnen rekenen naar absolute (grond)waterstanden werden alle peilbuizen op de percelen en peilschalen in de sloot ook ingemeten op NAP-niveau.

Het grond- en poriewater werd eens per twee maanden verzameld uit de poreuze cups die bij iedere peilbuislocatie waren geplaatst (figuur 2). De grondwaterkwaliteit werd bepaald op drie dieptes: ondiep in de geoxideerde kattekleibodem, iets dieper in de gereduceerde kattekleibodem, en het 'diepere' grondwater in de klei- of veenbodem onder de kattekleilaag. Het oppervlaktewater werd eens per twee weken bemonsterd en geanalyseerd in alle sloten binnen de wijk en in drie sloten die (potentieel) extern water aanvoeren, waarbij per sloot een mengmonster werd gemaakt van drie plekken verspreid over de lengte van de sloot. Bij alle peilbuizen werden ook eenmalig profielboringen van de bodem uitgevoerd, waarbij van de verschillende aangetroffen bodemlagen apart bodemmonsters werden verzameld. De bodemkwaliteit werd bepaald met behulp van een bodemdestructie en een zout- en waterextractie. Ieder groeiseizoen (zowel in 2018 als in 2019) werden vegetatieopnamen van de sloten gemaakt.

Katteklei in bodems en verzuring van grondwater

Een groot deel van het aanwezige zwavel (totaal-S) in de bodem is gebonden aan ijzer (totaal-Fe) in de vorm van pyriet (FeS_2 ; figuur 3). Dit geldt vooral voor de mid-

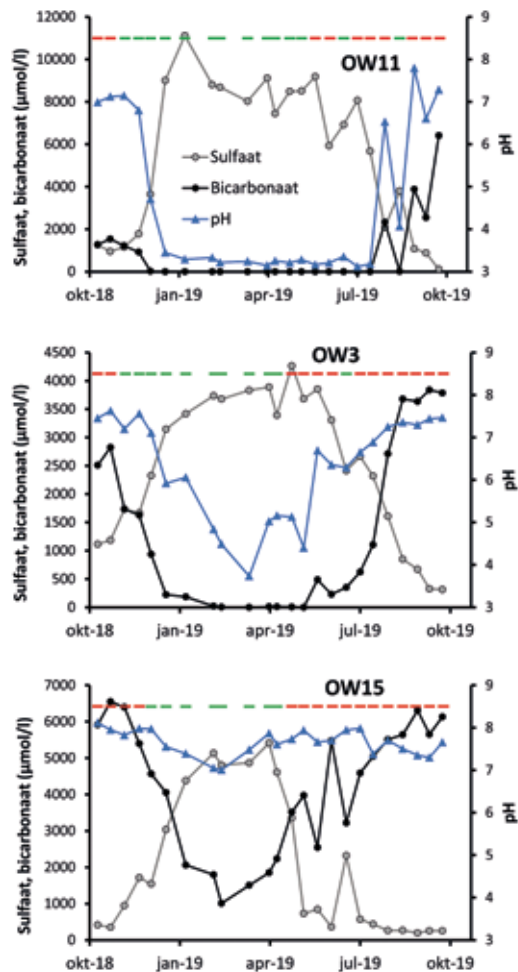


Figuur 3 Relatie tussen de totaal-Fe en de totaal-S concentratie in de bodem (linksboven), tussen de totaal-S in de bodem en pH in het bodemporewater (pw) (rechtsboven), tussen de totaal-Ca concentratie in de bodem en pH in het bodemporewater (pw) (linksonder), en tussen de ratio van totaal-S:totaal-Ca in de bodem en pH in het bodemporewater (pw) (rechtsonder) op verschillende dieptes gemeten: ondiep (in geoxideerde kattekleibodem), midden (in de gereduceerde katteklei bodem) en diep (in het veen of klei onder de katteklei bodem).

Figure 3 Relation between total-Fe and total-S concentrations in the soil (upper left panel), between total-S in the soil and the pH of soil pore water (pw) (panel upper right), between total-Ca concentrations in the soil and the pH of soil pore water (pw) (panel bottom left), and between the ratio of total-S:total-Ca in the soil and the pH of soil pore water (pw) (panel bottom right), measured at 3 depths: shallow (in oxidised cat-clay soil), middle (in reduced cat-clay soil) and deep (in peat or clay underneath the cat-clay soil).

Figuur 4 De pH, bicarbonaat (HCO_3^-) en sulfaat (SO_4^{2-})-concentraties in het oppervlaktewater voor sloot 3 (voorkomen diverse Oeverkruidsoorten), sloot 11 (dominantie vlottende bies), en sloot 15 (voorkomen algemene soorten). Een hoger grondwaterpeil dan het slootwaterpeil leidt tot uitspoeling van het grondwater naar de sloot, deze periode is weergegeven met de groene balkjes. Bij de rode balkjes was er juist geen sprake van uitspoelend grondwater (op basis van peilbuismetingen bepaald).

Figure 4 pH, bicarbonate (HCO_3^-) and sulfate (SO_4^{2-}) concentrations in the surface water for ditch 3 (presence of various Littorelletea species), ditch 11 (dominance of *E. fluitans*), ditch 15 (presence common species). When groundwater table are higher than the surface water level there will be a discharge of groundwater to the ditches, this period is highlighted with green bars. Red bars indicate absence of groundwater discharge (based on groundwater table measurements).



deldiepe (gereduceerde potentiële katteklei-) en diepe (veen- of klei)bodems waarin totaal-Fe en totaal-S vaak voorkomen in de verhouding 1:2. Met name in de warme (zomer) maanden zakt het grondwaterpeil in de percellen en vindt in de droge bodems oxidatie plaats van FeS_2 . Hierbij reageert het gereduceerde zwavel met zuurstof waarbij het wordt geoxideerd tot sulfaat (SO_4^{2-} ; Smolders et al., 2006a).

In de ondiepe bodems (geoxideerde katteklei) is een groot deel van het FeS_2 al eerder geoxideerd, waarna het goed oplosbare en mobiele SO_4^{2-} (deels) is uitgespoeld naar de sloten. Geoxideerd ijzer ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) is veel minder mobiel dan SO_4^{2-} waardoor er relatief meer totaal-Fe dan totaal-S in deze laag aanwezig is (figuur 3). Net als SO_4^{2-} kan gemobiliseerd Ca^{2+} (zie kader) uitspoelen naar de sloten, waardoor ook de totaal-Ca-gehalten van de bodem afnemen.

De mate waarin een pyrietrijke bodem verzuurt na oxidatie en zich tot een kattekleibodem zal ontwikkelen hangt af van de mate waarin de bodem in staat is om de zuurproductie te bufferen. Verzuring zal optreden wanneer de bodem relatief rijker is aan potentieel verzurend pyriet dan aan bufferende carbonaten en kationen: voor potentiële kattekleibodems wordt aangenomen dat deze kunnen verzuren bij een ratio van totaal-S:totaal-Ca > 1. In figuur 3 is te zien dat de geoxideerde bodems (toplaag) inderdaad verzuurd zijn bij een ratio van totaal-S:totaal-Ca > 1. Als gevolg van mobilisatie en uitspoeling van SO_4^{2-} zijn de concentraties totaal-S hier ook het laagst. De middeldiepe en diepe bodemlagen bevatten relatief meer totaal-S. De diepe bodemlagen die permanent nat zijn, en waar dus vrijwel geen oxidatie van pyriet plaatsvindt, worden gekenmerkt door een hoge pH, zelfs bij een hoge ratio totaal-S:totaal-Ca. In de middeldiepe bodemlagen, die (tijdelijk) wel aan zuurstof worden blootgesteld bij lage grondwaterstanden, treedt

vaak al wel verzuring op (figuur 3). Door de grote hoeveelheden FeS_2 in de bodems van de Groene Waterparel blijkt dat alleen de hoeveelheid totaal-Ca in de bodem al een goed voorspellende bodemfactor is voor de mate van verzuring. Bij een totaal-Ca-concentratie van < 100 mmol/kg bodem is er risico op verzuring, afhankelijk van de hoeveelheid FeS_2 die zal oxideren. Onder een totaal-Ca-concentratie van 30 mmol/kg is er altijd een pH < 5 en is dus altijd sprake van verzuring van het bodemwater.

Uitspoeling van grondwater naar aangrenzende sloten

Bij lage grondwaterstanden (droogval) in pyrietrijke bodems komt SO_4^{2-} , Fe^{2+} en H^+ (zuur) vrij. Als de pH in het grondwater hierdoor afneemt, geldt dat nog niet direct voor de sloten. Hiervoor moet eerst uitspoeling van het ondiepe grondwater naar de sloten plaatsvinden, wat met name gebeurt in de natte (winter)maanden wanneer het grondwaterpeil in de percelen hoger is dan het slootpeil - gedurende het monitoringsjaar was dat grofweg het geval van november 2018 tot in april 2019. Gedurende de drogere (zomer)maanden vond uitspoeling naar de sloten slechts incidenteel plaats na hevige regenval (figuur 4). In de periode waarin het slootpeil hoger was dan de grondwaterstand in de percelen vond geen uitspoeling plaats naar de sloten. In deze periode zakken de grondwaterstanden in de percelen uit waarbij ook de oxidatieprocessen plaatsvinden die voor de oxidatie en verzuring zorgen.

Figuur 4 geeft het verloop weer van de pH en de concentraties SO_4^{2-} en HCO_3^- in het oppervlaktewater voor drie sloten in het gebied met een verschillende vegetatieontwikkeling. Sloot 11 werd volledig gedomineerd door vlottende bies en verzuurde sterk (tot een pH-waarde van 3,2) vanaf het moment dat er grondwater naar de sloot

Oxidatieprocessen in kattenklei (pyriet)bodems

Oxidatie van pyriet kan volledig of onvolledig verlopen. Wanneer de oxidatie onvolledig verloopt, komt er behalve SO_4^{2-} ook relatief goed oplosbaar gereduceerd Fe^{2+} vrij (reactie 1); bij een volledige oxidatie wordt ook het gereduceerde Fe^{2+} geoxideerd tot immobiele Fe(III) hydroxides (reactie 1 en 2 samen) (Singer, 2010).

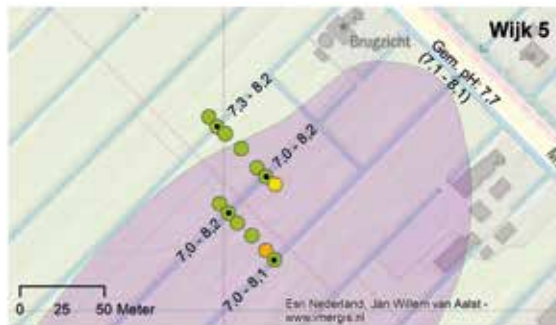
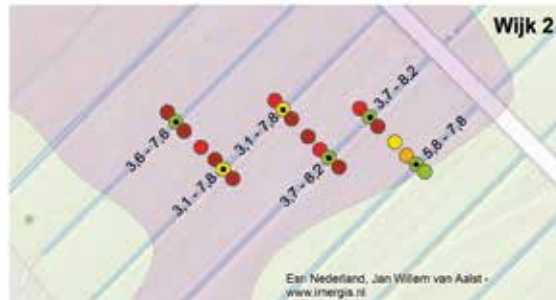
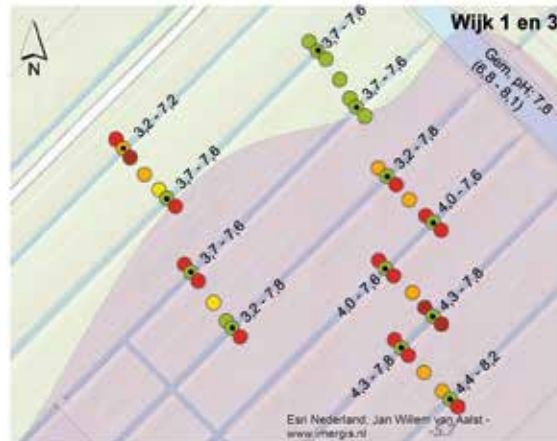
1. $\text{FeS}_2 + 7 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+$ (onvolledige oxidatie)
2. $\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 10 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe(OH)}_3 + 8 \text{H}^+$ (samen met (1) volledige oxidatie)

Uit de reactievergelijkingen (1) en (2) blijkt dat de oxidatie van pyriet tevens leidt tot de productie van zuur (protonen, H^+). Via bufferreacties in de bodem kan dit zuur worden geneutraliseerd waardoor er netto geen, of in minder sterke mate verzuring plaatsvindt (geen of minder grote afname van de pH). Deze bufferreacties vinden plaats in verschillende pH-ranges (naar Ulrich, 1981; Goulding, 2016); tussen pH 6,8-8 vindt er bicarbonaat (HCO_3^-)-buffering plaats (reactie 3), vanaf pH 7 en lager vindt er buffering plaats door het oplossen van calciumcarbonaten (reactie 4 en reactie 5), en tussen pH 4 - 6,8 is er sprake van kationuitwisseling vanaf het bodemadsorptiecomplex (reactie 6).

3. $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
4. $\text{CaCO}_3 + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
5. $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 4 \text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
6. $]-\text{Ca}^{2+} + 2 \text{H}^+ \rightarrow]-2 \text{H}^+ + \text{Ca}^{2+}$

Pyriet-oxidatie leidt in eerste instantie dus tot de vorming van equivalente hoeveelheden SO_4^{2-} en $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, waarbij Ca^{2+} het dominante kation is dat zorgt voor de buffering (reactie 6).

Legenda



Figuur 5 Gemiddelde pH in het grondwater van de geoxideerde kattenkleilaag, aangegeven met gekleurde punten (pH < 3,5: donkerrood; pH 3,5-4,0: lichtrood; pH 4,0-4,5: oranje, pH 4,5-5: geel; pH > 5: groen). In de sloot staat de gemiddelde pH in het oppervlaktewater (met de minimum en maximum pH-waarde).

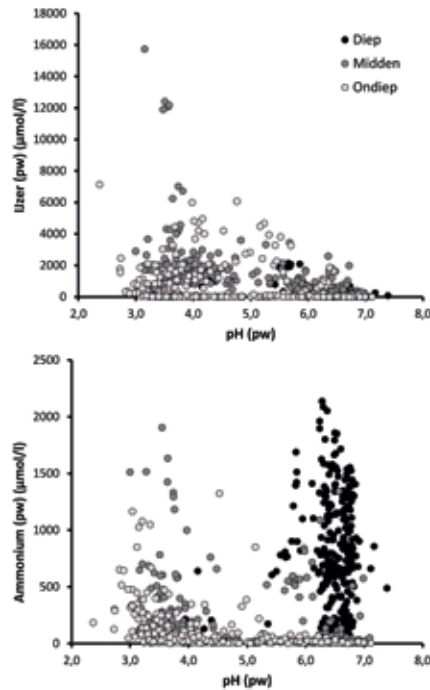
Figure 5 Average pH values in the groundwater of the oxidised cat-clay soil, indicated with bullets (pH < 3,5: dark red; pH 3,5-4,0: light red; pH 4,0-4,5: orange, pH 4,5-5: yellow; pH > 5: green). In the ditches a year average of pH in the surface water is given (together with the minimum and maximum pH value).

stroomde. De SO_4^{2-} -concentratie nam ook sterk toe, terwijl de HCO_3^- -concentratie afnam tot 0. De sloot bleef langdurig zuur, tot in juli 2019, terwijl er vanaf half juni geen zuur en sulfaatrijk grondwater meer uitspoelde. Zonder uitspoeling worden interne processen die de waterkwaliteit bepalen dominant. Vanaf half juli nam de pH van het oppervlaktewater sterk toe, terwijl de SO_4^{2-} -concentratie afnam door sulfaatreductie in de waterbodem (figuur 4, boven; Smolders et al., 2006b). Daarbij komt anorganisch koolstof vrij in de vorm van HCO_3^- , waardoor de waterbodem gebufferd blijft. Interessant is dat alle onderzochte waterbodems jaarrond (zeer) sterk gebufferd bleven, ondanks de verzuring van het oppervlaktewater. Omdat de waterbodem zuur zal bufferen, kan het oppervlaktewater alleen maar zuur blijven zolang er voldoende zuur water naar de sloten stroomt.

In de droge periode nam ook de invloed van gebufferd inlaatwater toe; vanaf april werd er in het gebied water ingelaten. Deze invloed bleek af te hangen van de mate van aantakking, zo waren in sloot 3 dezelfde processen terug te zien als in sloot 11, maar in mindere mate (figuur 4, midden). De periode van verzuring bleek hier ook korter: vanaf half april stroomde er geen zuur grondwater meer uit de percelen, waardoor de pH en HCO_3^- -concentratie eerder stegen en de SO_4^{2-} -concentratie eerder daalde dan in sloot 11. Dit was terug te zien aan de vegetatie, die in deze sloot niet alleen bestaat uit knolrus en vlottende bies, maar onder andere ook uit brede waterpest (*Elodea canadensis*), waterlelie (*Nymphaea alba*), drijvend fonteinkruid (*Potamogeton natans*) en kleinste egelskop (*Sparganium natans*). De mate van verzuring in de sloten is dus geheel afhankelijk van de plaatselijke hydrologie in een perceel en de mate van aanvoer van extern oppervlaktewater.

In sloot 15 (in wijk 5) vond helemaal geen verzuring plaats (gemiddelde pH-waarde van 7 jaarrond), en wordt

de vegetatie gedomineerd door o.a. smalle waterpest (*Elodea nutallii*), glanzend fonteinkruid (*Potamogeton lucens*) en pijlkruid (*Sagittaria sagittifolia*). Er vond echter wel uitspoeling van grondwater plaats in de natte perioden, waarbij de SO_4^{2-} -concentratie toenam en de HCO_3^- -concentratie afnam (figuur 4, onder). Het grondwater dat naar de sloot stroomde was dus rijk aan SO_4^{2-} maar niet zuur (figuur 5) omdat de bodem in dit deel van het gebied niet alleen rijk is aan FeS_2 , maar ook hoge gehalten aan totaal-Ca heeft. Er was dus (nog) voldoende buffering in de bodem om de oxidatie van FeS_2 op te vangen. Daarbij zijn de sloten in deze wijk direct aangetakt aan het inlaatwater uit de aanvoersloot naast de Middelweg. In alle drie de genoemde sloten vond SO_4^{2-} -uitspoeling plaats tijdens natte maanden. Dat was te verwachten omdat overal pyrietrijke klei werd gevonden in de bodems. De uiteindelijke verzuring in de sloten hangt samen met de mate van verzuring van het grondwater in de percelen en de hoeveelheid en duur van de uitspoeling van dit grondwater naar de sloten. Bij langdurige toestroom van zuur grondwater zullen de sloten lang zuur blijven. Omdat de waterbodems gebufferd blijven en er vanaf april gebufferd oppervlaktewater wordt ingelaten, raken de sloten weer sterk gebufferd vanaf het moment dat er geen zuur water meer toestroomt. De invloed van inlaatwater is goed terug te zien in sloot 7 (figuur 1 en 5). Deze sloot ligt in een wijk met een verzuurde toplaag en veel uitspoeling van grondwater naar de sloot. Toch verzuurt het oppervlaktewater maar gedurende een zeer korte periode, omdat de sloot direct is aangetakt op de Vierde Tocht, waaruit gebufferd water wordt aangevoerd. De waterkwaliteit in het gebied varieert dan ook zowel in ruimte als in tijd van zeer zuur naar zeer sterk gebufferd (figuur 5).



Figuur 6 Concentraties van gereduceerd ijzer (Fe^{2+}), fosfor (P), ammonium (NH_4^+) en aluminium (Al^{3+}) in het poriewater (pw) van de geoxideerde katteklei bodem (ondiep), gereduceerde katteklei bodem (midden) en de veen- of kleibodem onder de katteklei bodem (diep).

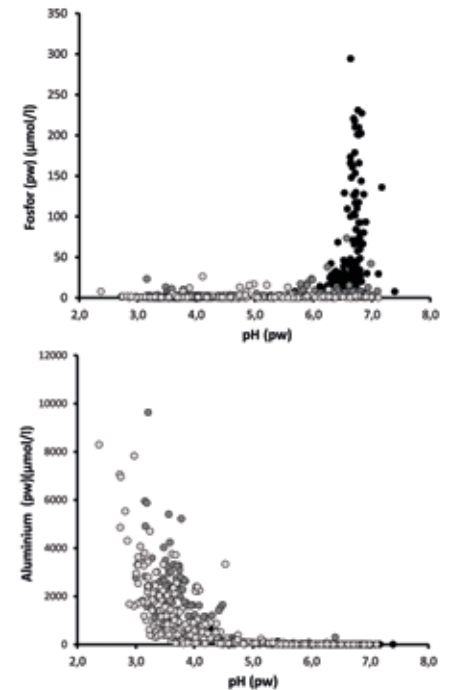
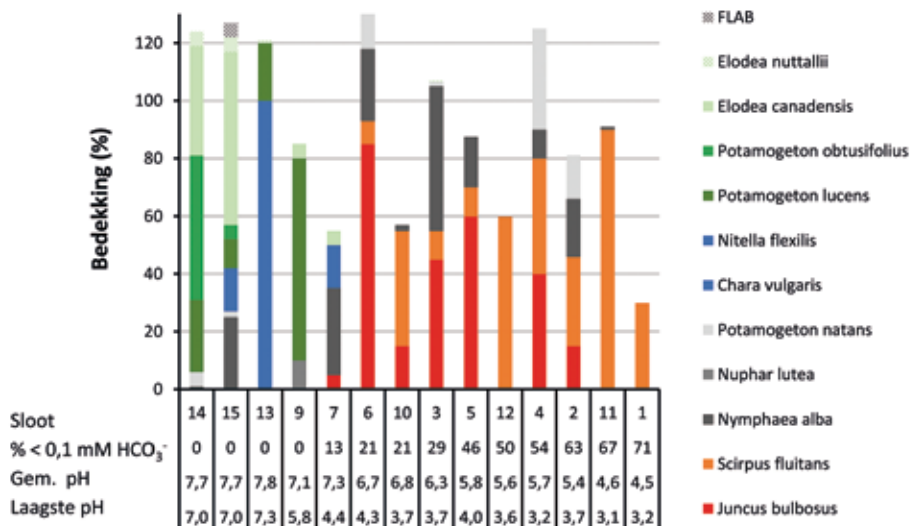


Figure 6 Concentrations of reduced iron (Fe^{2+}), fosfor (P), ammonium (NH_4^+) and aluminium (Al^{3+}) in soil pore water (pw) of the oxidised cat-clay soil (shallow), reduced cat-clay soil (middle) and the peat or clay soil underneath the cat-clay soil (deep).



Figuur 7 De bedekking van diverse soorten die voorkomen in de sloten van de Groene Waterparel, met het % van de tijd dat de gemiddelde HCO₃ concentratie in het oppervlaktewater lager was dan 0,1 mmol/L, de gemiddelde pH en laagst gemeten pH in het oppervlaktewater van de corresponderende sloten.

Figuur 7 Cover of different plant species that are present in the ditches of the Groene Waterparel, with % of the time that the average HCO₃ concentration in the surface water was below 0,1 mmol/L, the average pH and lowest pH in the surface water of the corresponding ditches.

Waterkwaliteit en vegetatie ontwikkeling in de sloten

De uitspoeling van het ondiepe grondwater naar de aangrenzende sloten beïnvloedt in natte periodes de waterkwaliteit in sterke mate. Koolstof is tijdens de natte periodes in het gebied vooral beschikbaar in de vorm van CO₂, door de veelal lage pH in het oppervlaktewater (zie kader). Het uitspoelende zure grondwater bevat bovendien niet alleen veel SO₄²⁻, maar ook hoge concentraties Fe²⁺, aluminium (Al³⁺) en ammonium (NH₄⁺; figuur 6). De concentraties fosfor (P) en orthofosfaat (PO₄³⁻) in het grondwater zijn juist laag, omdat in de toplagen van de percelen een overmaat aan geoxideerd Fe(OH)₃ aanwezig is waaraan P sterk wordt gebonden. Een deel van het ijzer uit de percelen zal echter ook uitspoelen naar de sloten. In het oppervlaktewater kan dit ijzer aan fosfaat binden en uitzakken naar de waterbodem, waardoor de P-beschikbaarheid zowel in de bodems als in de water-

laag van de sloten laag blijft (o.a. Lucassen et al., 2005; Smolders et al., 2012).

De mate waarin de sloten verzuren (zowel de absolute verzuring als de duur ervan) en de effecten van het uitspoelende grondwater op de waterkwaliteit hebben duidelijk invloed op de vegetatieontwikkeling. De kenmerkende soorten uit de Oeverkruid-klasse die in de boerensloten voorkomen gebruiken NH₄⁺ als stikstofbron en worden meestal aangetroffen in ondiep en helder, licht zuur (pH 5 – 7,5), zwak gebufferd en oligotroof (PO₄³⁻ < 0,5 μmol/l; NO₃⁻ < 10 μmol/l) water (Arts, 1990). Van de Littorelletea-soorten die te vinden zijn in de Groene Waterparel zijn vooral knolrus en vlottende bies overvloedig aanwezig (figuur 7). De lage pH, voedselarme (weinig P) en relatief CO₂-rijke condities in het oppervlaktewater zijn een uitermate goede niche voor deze soorten. Van knolrus, vlottende bies en teer vederkruid (*Myriophyllum alterniflorum*) is bekend dat ze CO₂-gelimiteerd zijn en het competitievermogen toeneemt bij toenemende CO₂-concentraties in het oppervlaktewater (Lucassen et al., 1999; Roelofs et al., 1984; Bloemendaal & Roelofs, 1988; Spierenburg et al., 2009). Als er geen uitspoeling van grondwater plaatsvindt, over het algemeen in de warme, droge maanden, zijn interne processen in de sloten (zoals de buffering vanuit de waterbodems) en aanvoer van inlaatwater bepalend voor de waterkwaliteit. De doelsoorten komen uitsluitend voor in sloten die lang genoeg zuur zijn (figuur 6: Oeverkruid-klasse; aangegeven met rood/oranje). In sloten die niet of maar weinig verzuren komen juist algemene soorten voor die kenmerkend zijn voor hard (en vaak ook wat P-rijker) water en die HCO₃⁻ als koolstofbron kunnen gebruiken (Bloemendaal & Roelofs, 1988), zoals glanzend fonteinkruid, brede waterpest en gewoon kransblad (*Chara vulgaris*). Er is dus sprake van een zeer bijzondere situatie, waarin op korte afstand van elkaar sloten worden aan-



Figuur 8 Vegetatie van naaldwaterbies (*Eleocharis acicularis*) in één van de sloten. Foto: Yvon Verstijnen.

Figuur 8 Vegetation of Needle Spikerush (*Eleocharis acicularis*) in one of the ditches. Photo: Yvon Verstijnen.

getroffen met zeldzame soorten die indicatief zijn voor zuur of zeer zacht water (Oeverkruid-klasse), maar ook heldere en biodiverse sloten met algemenere soorten die juist indicatief zijn voor zeer hard water.

Synthese

De aanwezigheid van katteklei en voldoende uitspoeling van zuur grondwater kan in sloten van het Nederlandse laagveen- en zeekleigebied voor een waterkwaliteit zorgen die voldoet aan de voorwaarden voor het voorkomen van soorten van de Oeverkruid-klasse, ondanks het feit dat er alleen gedurende de natte periodes van het jaar zuur water naar de sloten stroomt. Jaarrond blijven de CO₂-concentraties voldoende hoog en de fosfaatconcentraties van het oppervlaktewater juist laag. Toch heeft de duur van de zure omstandigheden in de sloten invloed op de vegetatiesamenstelling. De doelsoorten van de Oeverkruid-klasse komen met name voor in sloten die lang genoeg (> 2 maanden) zuur blijven. De lage

P-beschikbaarheid (door de toestroom van ijzer via het zure grondwater) en vooral de zure omstandigheden in het voorjaar geven de doelsoorten een competitief voordeel ten opzichte van algemenere soorten die onder meer voedsel- en bicarbonaatrijke condities gedijen en niet goed tegen een (tijdelijk) lage pH kunnen.

In de Groene Waterparel zijn de condities uitermate gunstig voor doelsoorten van de Oeverkruid-klasse omdat de sloten over een relatief groot deel van het jaar behoorlijk geïsoleerd zijn en er aanvoer van zuur water uit de percelen plaatsvindt. Omdat de waterbodems - in tegenstelling tot het oppervlaktewater - jaarrond gebufferd zijn, blijft het oppervlaktewater alleen zuur zolang er toestroom vanuit de percelen plaatsvindt. De onderliggende biogeochemische processen kunnen echter snel worden verstoord en de plaatselijke hydrologie (mate van uitspoeling van grondwater en mate van isolatie/waterinlaat) is hierin sturend. Voor deze kwetsbare delen van de Groene Waterparel is het dus zaak de hy-

drologie in stand te houden en niet zomaar te wijzigen. Verder wordt onderzocht of er inrichtingsmaatregelen mogelijk zijn die de onderliggende biogeochemische processen niet verstoren maar juist verder versterken, zodat uitbreiding van de doelsoorten van de Oeverkruidklasse kan worden gerealiseerd. Een maatregel als het vasthouden van water in het gebied door de slootpeilen hoog op te zetten zou een averechts effect hebben, omdat hierdoor ook de uitspoeling van zuur grondwater uit de percelen afneemt. Hetzelfde geldt voor een eventuele maaiveldverlaging ten behoeve van natuurontwikkeling.

Ook in andere delen van holoceen Nederland, die vroeger door brak water gedrenkt werden, zijn gronden te vinden die meer of minder rijk aan FeS_2 zijn, zoals in Zuid- en Noord-Holland, Groningen en Oost-Friesland. Hier liggen wellicht kansen voor de ontwikkeling van soortgelijke vegetaties (Poelman, 1972). Met een relatief simpele screening van bodemfactoren (totaal-Fe, totaal-S en totaal-Ca) kan de aanwezigheid van FeS_2 en de mate van (potentiële) verzuring in het grondwater worden in-

geschat. Kattekleibodems kunnen verzuren bij een ratio van totaal-S:totaal-Ca > 1 , maar of dit ook echt gebeurt hangt af van de mate van oxidatie: dus hoe ver de grondwaterstanden uitzakken in de percelen. Er is inzicht nodig in de lokale hydrologie om potentiële ontwikkeling van doelsoorten in te kunnen schatten. Belangrijk daarbij is dat er voldoende zuur grondwater naar de sloten stroomt, en gedurende een voldoende lange periode. Enige mate van isolatie is een voorwaarde, wanneer het oppervlaktewater te veel wordt beïnvloed door gebufferd inlaatwater kunnen de sloten onvoldoende verzuren.

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt en begeleid door de Provincie Zuid-Holland (opdrachtgever). Wij danken ook het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard en onze enthousiaste veldmedewerkers Jeroen Graafland en Rick Kuiperij.

Summary

A unique phenomenon in 'de Groene Waterparel'. The presence of cat clay leads to *Littorelletea* vegetation in farm ditches

José van Diggelen, Yvon Verstijnen, Jan Roelofs & Fons Smolders

Cat-clay, pyrite, *Littorelletea*, soft water vegetation

A special phenomenon occurs in the Groene Waterparel, located in the Zuidplaspolder (the Netherlands). While most Dutch polder systems are known for nutrient-rich and buffered water, *Littorelletea* species, characteristic for nutrient-poor and acidic to weakly buffered water,

have been found in ditches of this area since the 1970's. This is all due to the presence of acid sulphate soils (cat clay), which leads to high concentrations of acid (protons), iron and sulphate in shallow groundwater when oxidised. Combined with sufficient leaching of acidic and iron-rich groundwater towards the ditches during wet periods, this creates a surface water quality in ditches for the *Littorelletea* species to occur. The low P availability, due to the influx of iron-rich groundwater, and a low pH during spring give the *Littorelletea* species a competitive advantage over more general species known for nutrient-rich conditions.

However, the duration of acidic conditions in the dit-

ches varies between ditches, due to differences in hydrology. In turn, this affects the vegetation composition of the ditches. Littorelletea species are particularly found in ditches that remain acidic for at least two months. As the sediments in these polder ditches are buffered all year round, the surface water only remains acidic as long as there is a sufficient influx of acidic groundwater. Therefore, the underlying biochemical

processes are sensitive to changes in local hydrology (both the amount of groundwater discharge and that of external water inlet during dry periods). Results from this research offer new perspectives for the conservation and development of these vegetations in the Groene Waterparel and possibly in other polders with cat clay, both in the Netherlands and abroad.

Literatuur

- Arts, G., 1990.** Deterioration of Atlantic Soft-Water systems and their Flora, a historical account. Nijmegen. Katholieke Universiteit Nijmegen, PhD-Thesis. hdl.handle.net/2066/113778
- Bloemendaal, F. H. J. & J.G.M. Roelofs, 1988.** Waterplanten en Waterkwaliteit. Utrecht. Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 189 pp.
- Goulding, K. W. T., 2016.** Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 32(3), 390–399.
- LNV, 2008.** Profielbeschrijvingen Habitatype H3110 en H3130. Natura 2000 profielendocument, versie 1 september 2008. Den Haag. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.
- Lucassen, E., R. Bobbink, M.M.A. Oonk, T.E. et al., 1999.** The effects of liming and reacidification on the growth of *Juncus bulbosus*: A mesocosm experiment. *Aquatic Botany*, 64(2), 95–103.
- Lucassen, E.C.H.E.T., A.J.P. Smolders & J.G.M. Roelofs, 2002.** Potential sensitivity of mires to drought, acidification and mobilisation of heavy metals: the sediment S/(Ca+Mg) ratio as diagnostic tool. *Environmental Pollution* 120(3): 635–646.
- Lucassen, E.C.H.E.T., A.J.P. Smolders, L.P.M. Lamers & J.G.M. Roelofs, 2005.** Water table fluctuations and groundwater supply are important in preventing phosphate eutrophication in sulphate-rich fens: consequences for wetland restoration. *Plant and Soil* 269: 109–115.
- Poelman, J.N.B., 1972.** Het kattenkleiverschijnsel in oude natuurwetenschappelijke literatuur. *Boor en Spade* 18(9): 41–49.
- Roelofs, J. G. M., J. A. A. R. Schuurkes & A. J. M. Smits, 1984.** Impact of acidification and eutrophication on macrophyte communities in soft waters. II. Experimental studies. *Aquatic Botany* 18, 389–411.
- Singer, S., 2010.** Acidic Mine Drainage : The Rate-Determining Step. *Advancement Of Science* 167 (3921), 1121–1123.
- Smolders, A.J.P., N. Moonen, K. Zwaga et al., 2006a.** Changes in pore water chemistry of desiccating sediments with different sulphur contents. *Geoderma* 132, 372–383.
- Smolders, A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen et al., 2006b.** Internal eutrophication: How it works and what to do about it – a review. *Chemistry and Ecology* 22(2), 93–111.
- Smolders A., T. van den Broek, E. Lucassen & B. Spanjers, 2012.** Monitoring proefsloten Lopikerwaard: hoe werkt een boerenloot in het veenweidegebied? *H₂O(17)*: 30–32.
- Spierenburg, P., E. Lucassen, A. Lotter & J. Roelofs, 2009.** Could rising aquatic carbon dioxide concentrations favour the invasion of elodeids in isoetid-dominated softwater lakes? *Freshwater Biology* 54, 1819–1831.
- Turlings, L.G. & M. Klinge, 2010.** Waterhuishoudingsplan Rode en Groene Waterparel Zuidplaspolder. Witteveen+Bos, rapportnummer GV942-1/winb/005.
- Ulrich, B., 1981.** Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 144(3): 289–305.
- Van den Broek, T., J. Groenendijk & B. Possen, 2016.** Bodemonderzoek in de Groene Waterparel. Royal Haskoning DHV, rapportnummer WATE_BE7968R001F02.
- Van der Goes, J.P.C., 2016.** Vegetatieonderzoek Groene Waterparel 2016. In opdracht van Provincie Zuid-Holland. Van der Goes en Groot. Van der G&G-rapport 2016-17.