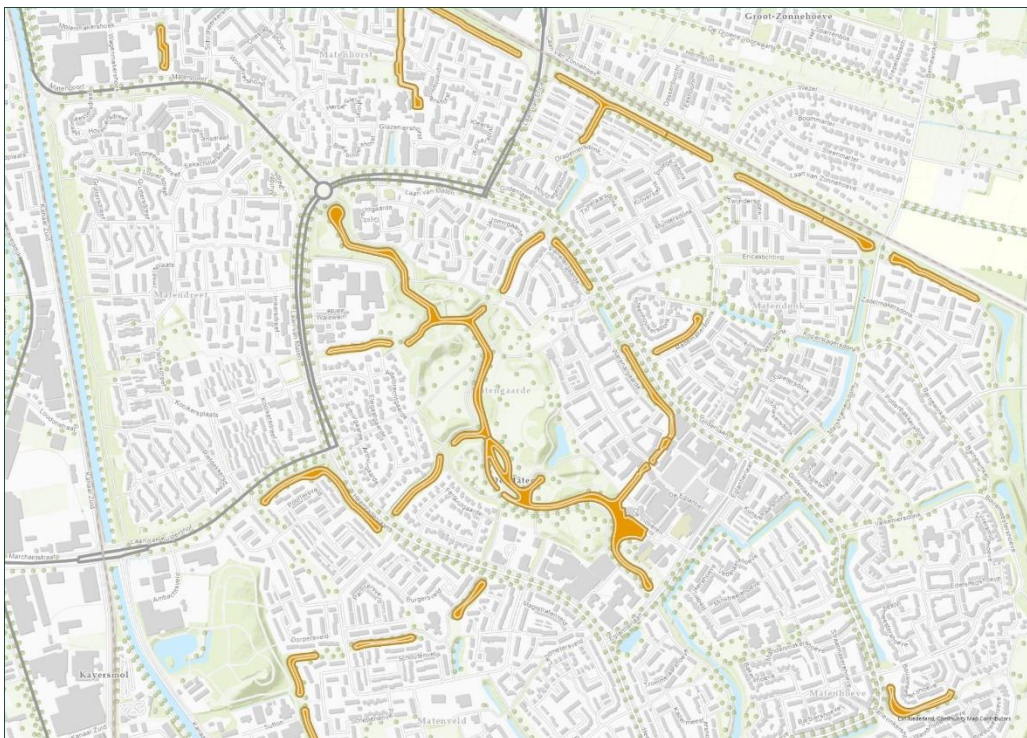


Bruinkleuring van Apeldoornse vijvers: kommer en kwel?

Yvon Verstijnen, Mark van Mullekom & Fons Smolders (Onderzoekcentrum B-WARE), Diederik Anema (gemeente Apeldoorn), Lotta Holsteijn, Andrea Swenne (Waterschap Vallei en Veluwe)

In verschillende woonwijken in Apeldoorn zijn in het verleden op grote schaal vijvers aangelegd, die vrij snel na aanleg bruin kleurden. Dit is een (in)direct gevolg van ijzerrijke kwel en biogeochemische processen. De bruinkleuring wordt weleens als visueel onaantrekkelijk beschouwd en draagt niet bij aan de belevingswaarde. In een pilotonderzoek om de kleuring te verminderen blijkt dat waterpeilopzet niet perse leidt tot minder kleuring. Baggeren heeft wel enig effect. De bruinkleuring is echter een natuurlijk fenomeen. Bij stedelijk waterbeheer wordt aansluiting bij natuurlijke watersystemen steeds belangrijker. Hiermee kan de bruinkleuring juist meer gewaardeerd worden.

Bij de ontwikkeling van woonwijken aan de oostkant van Apeldoorn zijn in de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw op grote schaal (geschakelde) vijvers aangelegd (afbeelding 1). De vijvers waren nodig om het van oorsprong kwelrijke en natte gebied onderaan de flank van de Veluwe te ontwateren en woongebieden 'met droge voeten' aan te leggen. Al vrij snel na de aanleg kleurde een aantal vijvers bruin (afbeelding 2). De mate van bruinkleuring kan per vijver of zelfs tussen stuwpanden verschillen. Deze 'roestvorming' wordt vaak veroorzaakt door ijzerhoudend grondwater. Het is een fenomeen dat van nature op grotere schaal voorkomt in de sprengen op de Veluwe en de sloten in de IJsselvallei. Uit een eerste onderzoek kwam naar voren dat de roestbruine kleur inderdaad een direct of indirect gevolg is van ijzerrijke kwel [1].



Afbeelding 1. Overzicht van de sterk roestbruingekleurde vijvers in zuidoost-Apeldoorn (De Maten)



Afbeelding 2. Duidelijk zichtbare bruinkleuring in het water van vijvers in Apeldoorn

Naast de functionele waarde (waterafvoer, ontwatering), hebben de vijvers de afgelopen jaren ook meer een (natuurlijke) belevingswaarde gekregen. In sommige vijvers wordt zelfs bijzondere kwelvegetatie aangetroffen, zoals duizendknoopfonteinkruid. Over het algemeen zijn de omwonenden gewend aan de roestbruine kleur van het water. Af en toe krijgen de gemeente Apeldoorn en Waterschap Vallei en Veluwe echter vragen over de bruine vijvers. Hoewel de waterkwaliteit doorgaans goed is, is het troebele water visueel minder aantrekkelijk en draagt dit niet (of in negatieve zin) bij aan de belevingswaarde van een vijver.

Pilotonderzoek

Het waterschap en de gemeente hebben om die reden door Onderzoekcentrum B-WARE laten onderzoeken of de kleur van de vijvers met relatief eenvoudige ingrepen te veranderen is. In sommige vijverpanden komt de roestkleur immers voor naast een hogergelegen pand met minder bruinkleuring. Dit kan te maken hebben met het verschil in kweldruk, een andere samenstelling van de ondergrond of een andere verhouding in de aanvoer van ijzerrijk grondwater en regenwater.

In het eerste onderzoek, uitgevoerd in 2016, is in kaart gebracht dat in Apeldoorn twee aspecten een rol spelen bij de bruinkleuring (zie kader) [1]: ten eerste de (continue) aanvoer van ijzerrijk grondwater en ten tweede de aanwezigheid en ophoping van ijzerrijk slib.

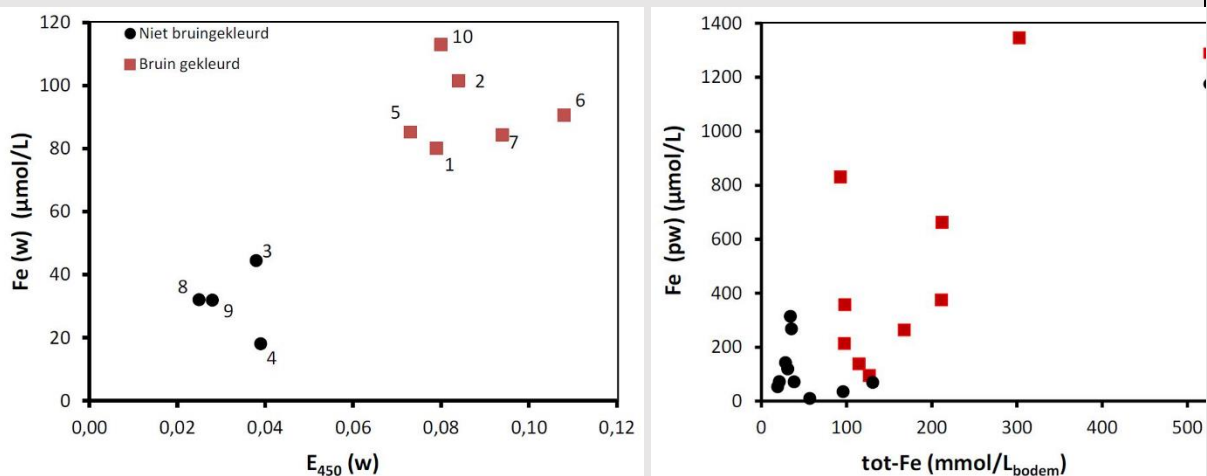
Tussen 2018 en 2023 zijn in een pilot twee mogelijke maatregelen om de bruinkleuring in de vijvers te verminderen onderzocht. De ene maatregel had betrekking op het verlagen van de aanvoer van ijzer via het grondwater. Door het hoger opzetten van de waterpeilen in de vijvers, kan kwel mogelijk worden weggedrukt. De andere maatregel had betrekking op het verwijderen van de (ijzerrijke) sliblaag op locaties waar weinig directe aanvoer van ijzer via het grondwater is. Het verwijderen van de sliblaag kan namelijk de nalevering van ijzer uit de bodem sterk verminderen.

Oorzaak en processen bruinkleuring in oppervlaktewater

In het eerste onderzoek [1] werden zowel oppervlaktewater, poriewater en waterbodems van bruingekeurde vijvers en niet bruingekeurde vijvers, als ook het grondwater onderzocht. Hieruit bleek dat diverse vijvers roestbruin kleuren door directe invloed van ijzerrijk grondwater. Het grondwater was lokaal ijzerrijk ($>100 \mu\text{mol/l}$) en rijk aan koolstofdioxide (CO_2). De CO_2 -concentraties van het oppervlaktewater van de bruingekeurde vijvers waren hoger dan voor de locaties zonder bruinkleuring. CO_2 -concentraties waren bovendien positief gecorreleerd met de ijzerconcentraties in het oppervlaktewater. Dit suggereert dat deze bruingekeurde vijvers onder invloed staan van het grondwater.

Het grondwater in Apeldoorn was verder op verschillende locaties (zeer) nitraatrijk. Dit nitraatrijke grondwater was juist arm aan ijzer. Dit komt omdat nitraat opgelost (gereduceerd) ijzer oxideert en tevens voorkomt dat er in de ondergrond ijzerreductie kan plaatsvinden.

Bij de vijvers waar ijzerrijk grondwater opkwelt zorgt dit grondwater voor een directe verhoging van de hoeveelheid ijzer in het oppervlaktewater. Het grondwater kan opgelost ijzer aanvoeren maar ook ijzer(hydr)oxides. Wanneer het aanwezige opgeloste ijzer in contact komt met zuurstof worden ook ijzer(hydr)oxiden gevormd die als colloïdale (zwevende) deeltjes in het oppervlaktewater terecht komen. De bruinkleuring in het oppervlaktewater wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van deze colloïdale ijzer(hydr)oxiden die in de waterlaag zweven. Hoe meer ijzer in het oppervlaktewater aanwezig is, hoe hoger de extinctie-waarde (een maat voor de kleuring van het water; afbeelding 3).



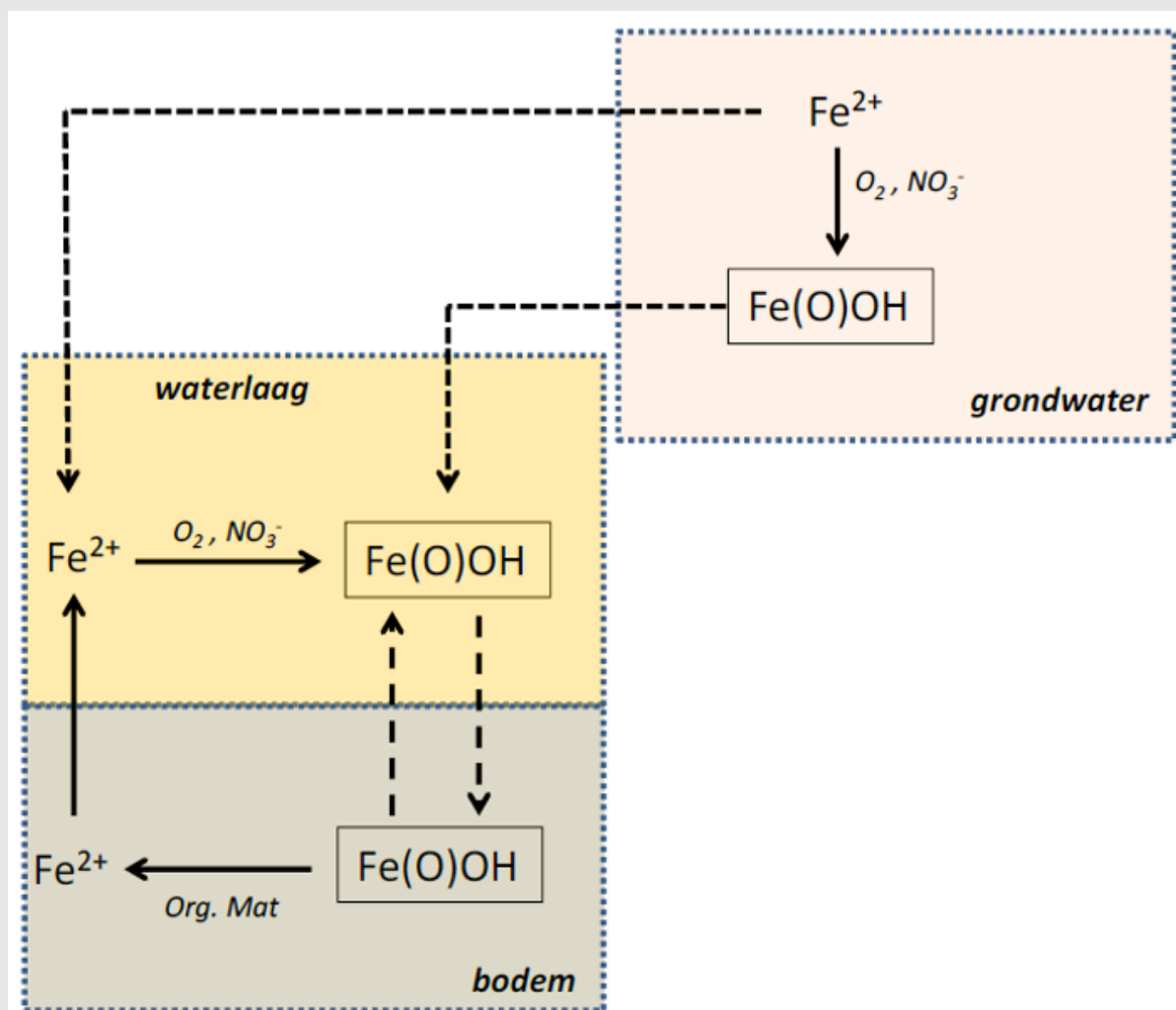
Afbeelding 3. Links: relatie tussen de ijzerconcentratie ($\mu\text{mol/l}$) en extinctie (450 nm) in het bemonsterde oppervlaktewater (w; bruin- en niet-bruingekeurde vijvers) in de vijvers die werden onderzocht in 2016. Rechts: relatie tussen de ijzerconcentratie ($\mu\text{mol/l}$) in het poriewater (pw) en de totaal-ijzerconcentratie (mmol/l) in de bodem (vaste bodem en sliblaag)

Naast de directe grondwatertoevoer, is op sommige vijverlocaties de grondwaterinvloed waarschijnlijk indirect. Het grondwater is hier niet ijzerrijk (veelal juist nitraatrijk), maar in deze vijvers bezinkt ijzerrijk slib dat elders ontstaat door de oxidatie van ijzer uit het aangevoerde grondwater (afbeelding 4).

Driewaardig ijzer in de ijzer(hydr)oxiden kan, bij afwezigheid van zuurstof, gebruikt worden als alternatieve elektronenacceptor bij de afbraak van organisch materiaal. In de zuurstofloze waterbodem kunnen dan de aanwezige ijzer(hydr)oxiden worden gereduceerd tot het goed oplosbare Fe^{2+} . De ijzerrijke vijverbodems hadden dan ook vaak hogere opgeloste ijzerconcentraties

in het poriewater (zie afbeelding 3). Naast dit oplosbare ijzer komt ook fosfaat, dat aan de ijzer(hydr)oxides was gebonden, vrij in het poriewater. Dit vrijkomende fosfor kan weer worden gebonden aan nog niet gereduceerde ijzer(hydr)oxides, wanneer hiervan een overmaat aanwezig is. Wanneer de concentraties ijzer (en fosfaat) in het poriewater hoger zijn dan in de waterlaag kan het naar de waterlaag diffunderen (afbeelding 4).

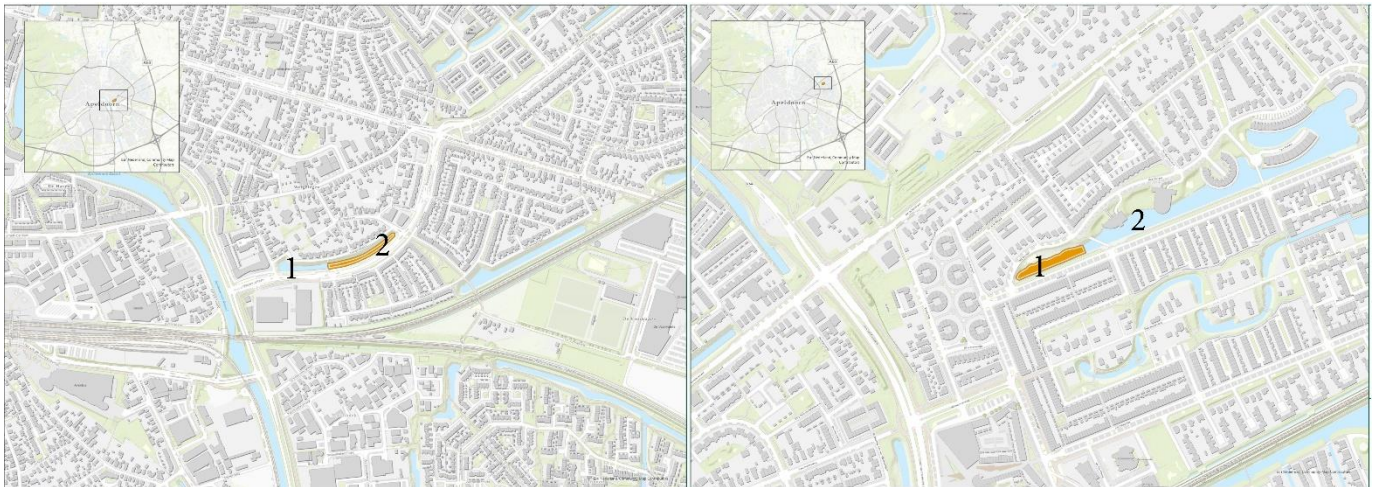
Als het oppervlaktewater veel zuurstof bevat wordt het ijzer geoxideerd op de overgang van de waterbodem naar de waterlaag, waardoor het niet (of minder) in de waterlaag terecht komt. Wanneer de waterlaag armer is aan zuurstof kan het ijzer wel naar de waterlaag diffunderen, waardoor het zich in de waterlaag ophoopt. Hier reageert het gereduceerde ijzer met nitraat of restantjes zuurstof die in de waterlaag aanwezig zijn, waardoor het water roestbruin kleurt. Ook kunnen colloïdale ijzer(hydr)oxide-deeltjes in suspensie gaan in de waterlaag door fysische processen, zoals gasvorming in de waterbodems en windwerking.



Afbeelding 4. Schematische weergave van de interactie tussen grondwater, waterbodem en waterlaag, die de roodkleuring, door Fe(O)OH (ijzer(hydr)oxides), van het water bepalen [1]

Opzet maatregelen in pilot

Beide maatregelen (peilopzet en baggeren) om de bruinkleuring tegen te gaan werden elk in één van de vijvers uit het eerste onderzoek getest. Dit waren respectievelijk een vijver in de wijk Welgelegen en een vijver in de wijk Osseveld (afbeelding 5). Op 1 april 2019 werd op locatie Welgelegen 1 (bovenstrooms vak van de vijver) het peil opgezet met circa 30 cm (naar 9,9 +NAP). Op 1 mei 2019 werd op locatie Welgelegen 2 (vak met de meeste bruinkleuring) het peil met circa 50 cm opgezet (naar 9,0 +NAP). Het water stroomt van Welgelegen 1 naar Welgelegen 2. Op locatie Osseveld 1 (bovenstrooms vak met de meeste bruinkleuring), werd het slib (nat) weggebaggerd tussen eind augustus en begin september 2021. Op locatie Osseveld 2 werden geen maatregelen getroffen. Het water stroomt van Osseveld 1 naar Osseveld 2.



Afbeelding 5. Pilotvijvers in de wijken Welgelegen (links) en Osseveld (rechts). Beide vijvers hebben een peilvak zonder of met weinig bruinkleuring en een peilvak met sterke bruinkleuring. De sterk gekleurde peilvakken, onder invloed van respectievelijk ijzerrijk grondwater en ijzerrijk slib, zijn weergegeven met de oranje-bruine kleur

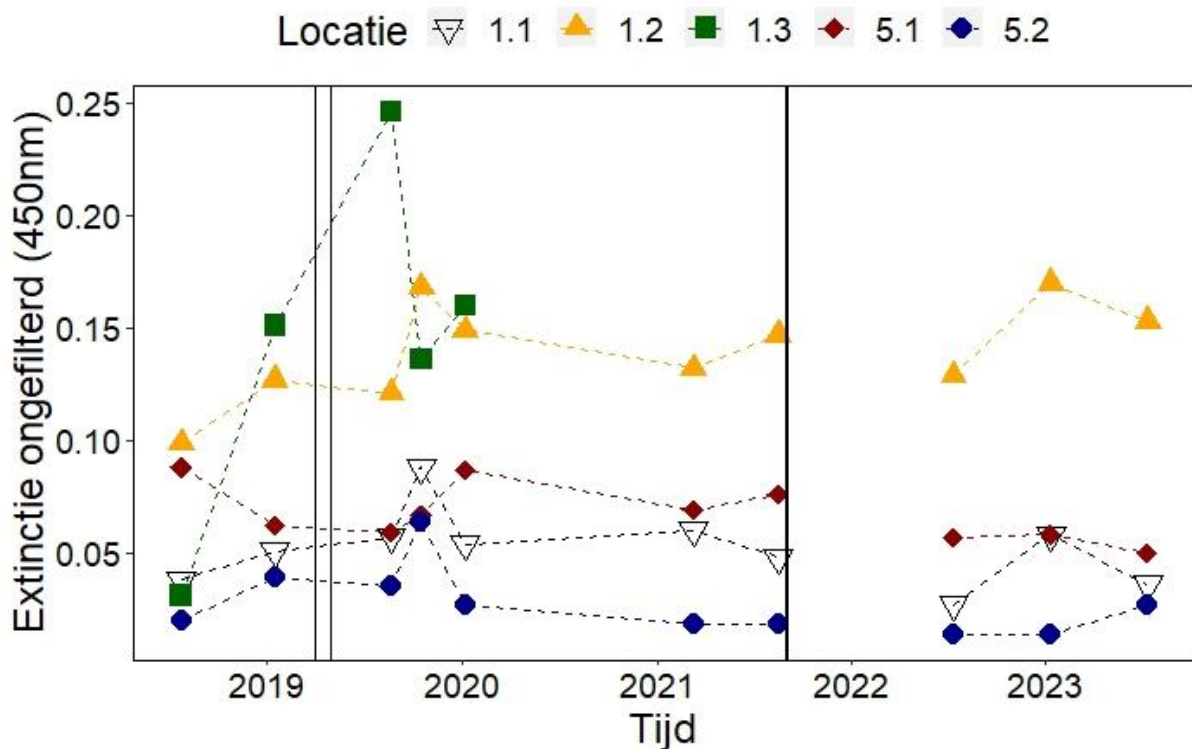
Beide vijvers werden tot ten minste twee jaar na de maatregel in zowel de zomer als de winter gemonitord. Hierbij werden telkens grondwatermonsters genomen uit de nabijgelegen peilbuizen en op elke sublocatie een oppervlaktewatermonster (OW). Tevens werd op elke sublocatie per monsterronde een mengmonster van de (slib)bodem geanalyseerd, inclusief het poriewater van de bodem. Water- en bodemmonsters werden geanalyseerd op diverse fysisch-chemische variabelen. Maandelijks bemonsterde en analyseerde Waterschap Vallei en Veluwe ook het oppervlaktewater.

Resultaten peilopzet

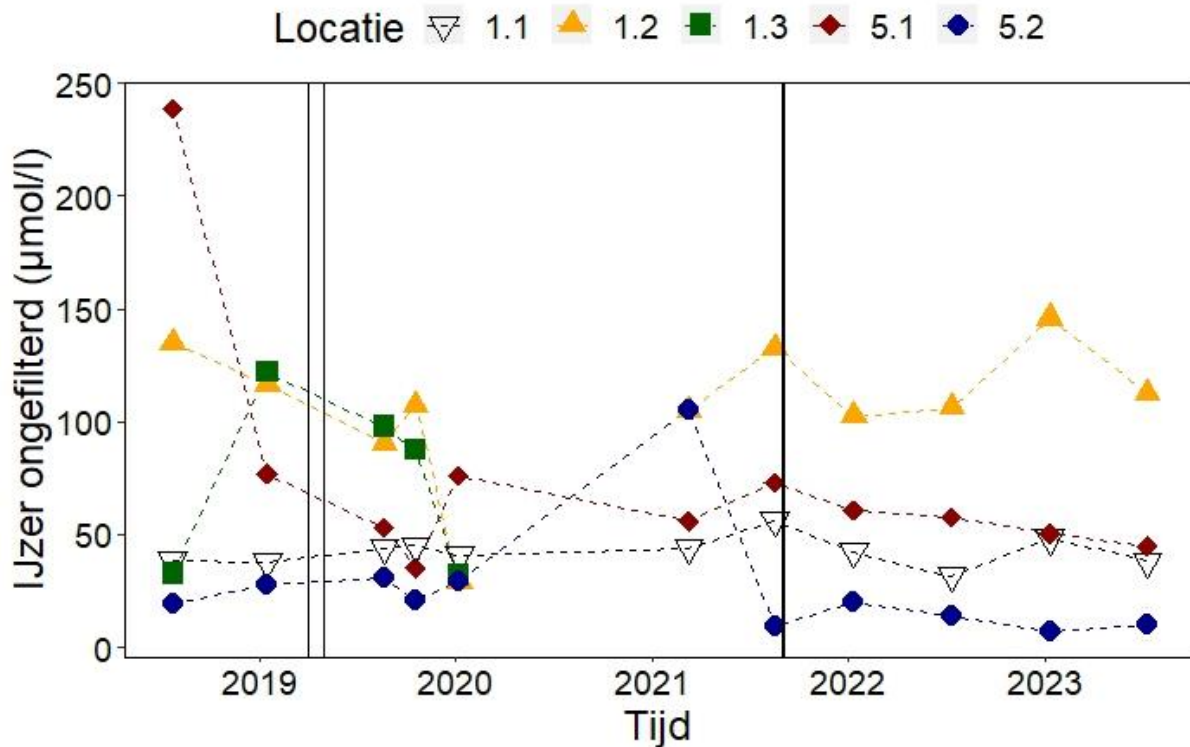
Het opzetten van het peil in vijver Welgelegen heeft niet geleid tot een afname van de extinctie (een maat voor de kleuring) in het oppervlaktewater (afbeelding 6). De extinctie op locatie 1 was vóór en na de peilopzet vergelijkbaar (circa 0,05). De extinctie op locatie 2 was altijd hoger dan op locatie 1 en in vijver Osseveld (afbeelding 5). Dit was ook te verwachten op basis van de waargenomen waterkleur. De (ongefilterde) ijzerconcentraties in het oppervlaktewater van Welgelegen 2 bevatte doorgaans ook het meeste ijzer (afbeelding 7). De extinctie en de ijzerconcentraties zijn dan ook positief met elkaar gecorreleerd (zie kader). Vlak na de peilopzet leek de ijzerconcentratie iets af te nemen, maar na verloop van tijd waren deze weer op hetzelfde niveau als voor de peilopzet (circa 120 $\mu\text{mol/l}$). De

ijzerconcentraties van Welgelegen 1 waren stabiel en lieten geen verschil zien tussen voor en na peilopzet.

De waterbodems in de vijver waren ijzerrijk (gemiddeld \pm standaarddeviatie 204 ± 158 op locatie 1 en 728 ± 303 mmol/kg droge bodem op locatie 2, na peilopzet). Wanneer het peil is opgezet maar de bodems ijzerrijk zijn, kan er nog steeds bruinkleuring van de waterlaag optreden door de uitwisseling van ijzer en ijzercolloïden met de sliblaag (zie kader). Het hoger opzetten van het peil kan leiden tot minder doorstroming. Dit kan zorgen voor meer slibbezinking en meer zuurstofconsumptie in de waterlaag en de slibbodems, waardoor de waterlaag zuurstofarmer wordt. De mate waarin de waterlaag zuurstofarm wordt, wordt ook sterk bepaald door de belasting van de waterlaag met organisch materiaal (overstorten, bladinvall, het voeren van vissen of vogels). Door lage zuurstofconcentraties kan de nalevering van ijzer en fosfor uit de sliblaag toenemen. De zuurstofgehalten in beide peilvakken van de vijver laten zien dat er periodiek zuurstofloosheid optreedt (<2 mg/l). Het is dus waarschijnlijk dat er nalevering van ijzer (en fosfor) heeft plaatsgevonden.



Afbeelding 6. Extinctiewaarden (o.b.v. 450 nm) in het oppervlaktewater van de onderzochte vijvers in de wijk Welgelegen en Osseveld. De verticale lijnen geven respectievelijk de momenten van peilopzet (in Welgelegen 1 en 2, 2019) en baggeren (Osseveld 1, 2021) weer



Afbeelding 7. IJzerconcentraties (ongefilterd in µmol/l) in het oppervlaktewater van de onderzochte vijvers in de wijk Welgelegen en Osseveld. De verticale lijnen geven respectievelijk de momenten van peilopzet (in Welgelegen 1 en 2, 2019) en baggeren (Osseveld 1, 2021) weer

Resultaten van baggeren

Op locatie Osseveld 1 werd de sliblaag weggebaggerd in de zomer van 2021. De extinctie in het oppervlaktewater was na baggeren gemiddeld iets lager ($0,055 \pm 0,004$) dan ervoor ($0,073 \pm 0,012$) (afbeelding 6). Ook op locatie Osseveld 2 was de extinctie na het baggeren gemiddeld iets lager dan voor het baggeren. De laatste meting (zomer 2023) geeft echter weer een iets hogere waarde.

De ijzerconcentraties in het oppervlaktewater van Osseveld 2 waren, net als de extinctie, het laagst ten opzichte van de andere locaties (afbeelding 7). Na het baggeren van Osseveld 1 lijkt de ijzerconcentratie iets af te nemen. Ook in het water van Osseveld 2 waren de concentraties na het baggeren doorgaans iets lager ($<20 \mu\text{mol/l}$) dan ervoor (doorgaans $>20 \mu\text{mol/l}$).

Na het (nat) baggeren van Osseveld 1 is er ijzerrijk slib achtergebleven. Er treedt ook enige slibaanwas op, zoals blijkt uit de slibdiktemetingen die werden uitgevoerd (ca. 6 cm in januari 2022 tot ca. 15 cm in juli 2023). De slibdikte is echter wel variabel over ruimte en tijd. Het slib was voor het baggeren op locatie 1 rijker aan totaal-ijzer, -fosfor en -zwavel. Na het baggeren waren de concentraties in de waterbodem weliswaar lager (zie tabel 1; o.a. totaal-Fe: $580 \pm 79 \text{ mmol/kg}$ droge bodem voor baggeren, versus 379 ± 110 na baggeren), maar nog steeds hoog. Op locatie 2 bevatte het slib na het baggeren van locatie 1 iets meer ijzer en fosfor, mogelijk door bezinking van colloïdale deeltjes of door de ruimtelijke variatie in de bodem.

De ijzerconcentratie in het poriewater van de slibbodem van Osseveld 1 was na baggeren gemiddeld lager dan vóór het baggeren (tabel 1). Omdat ijzer aan fosfor kan binden (zie kader), is de ijzer:fosforratio in het poriewater een indicator voor mogelijke fosfaatnalevering van de waterbodem naar de waterlaag en de fosforbeschikbaarheid [2]. Fosfor is een belangrijk nutriënt en kan bij te hoge beschikbaarheid in het poriewater zorgen voor een grotere voedselrijkdom. Dit kan leiden tot

waterkwaliteitsproblemen, zoals (blauw)algenbloei. De ijzer:fosfor-ratio was gunstig, zowel vóór als na het baggeren ($>>1$). Bij een hoge ratio is er onder zuurstofrijke omstandigheden geen risico op fosfaatnalevering naar de waterlaag en dus minder risico op voedselrijk water. Bij de veldmetingen werd geen zuurstofloosheid gemeten ($\geq 5 \text{ mg O}_2/\text{l}$). Op locatie 2 waren de fosforconcentraties niet hoog in het poriewater en de ijzerconcentraties waren lager dan op locatie 1.

Tabel 1. Gemiddelde organisch-stofgehalte (OS-gloeiverlies in %) en concentraties van enkele variabelen in het (achtergebleven) slib (mmol/kg droge bodem) en poriewater van het slib ($\mu\text{mol/l}$) op locatie Osseveld 1 en Osseveld 2. Gemiddelden van vóór en na baggeren van Osseveld 1 (zomer 2021)

| | | % | mmol/kg | mmol/kg | mmol/kg | mmol/kg | $\mu\text{mol/l}$ | $\mu\text{mol/l}$ |
|----------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| Locatie | | OS | Al | Fe | P | S | Fe-pw | P-pw |
| Voor baggeren | Oss. 1 | 9,5 | 245 | 580 | 43 | 142 | 1183 | 13,3 |
| | Oss. 2 | 7,1 | 242 | 202 | 11 | 119 | 290 | 5,0 |
| Na baggeren | Oss. 1 | 9,4 | 384 | 379 | 29 | 77 | 857 | 17,1 |
| | Oss. 2 | 7,7 | 332 | 286 | 15 | 92 | 215 | 10,9 |

Synthese

Het opzetten van het peil, zoals getest in vijver Welgelegen, heeft tot nu toe geen effect gehad op de bruinkleuring van het oppervlaktewater. Het is aannemelijk dat de invloed van het grondwater alsnog zeer groot is, waardoor de ijzertoevoer relatief groot blijft. Daarnaast is de waterbodem (zeer) rijk aan ijzer, wat ook een bron van ijzer en daarmee een oorzaak van de kleuring is.

Het baggeren van de slibbodem in vijver Osseveld (op locatie 1) lijkt effect te hebben gehad op de oppervlaktewaterkwaliteit (iets afgenomen extinctie en ijzerconcentratie). Het effect is echter beperkt. Allereerst wordt door het baggeren niet alle slib verwijderd (nat baggeren is vaak wat minder effectief dan droog baggeren). Daarnaast lijkt het erop dat er slib van verder bovenstrooms wordt aangevoerd dat deels bezinkt in de vijver. Dit leidt mogelijk opnieuw tot ophoping van potentieel ijzerrijk slib.

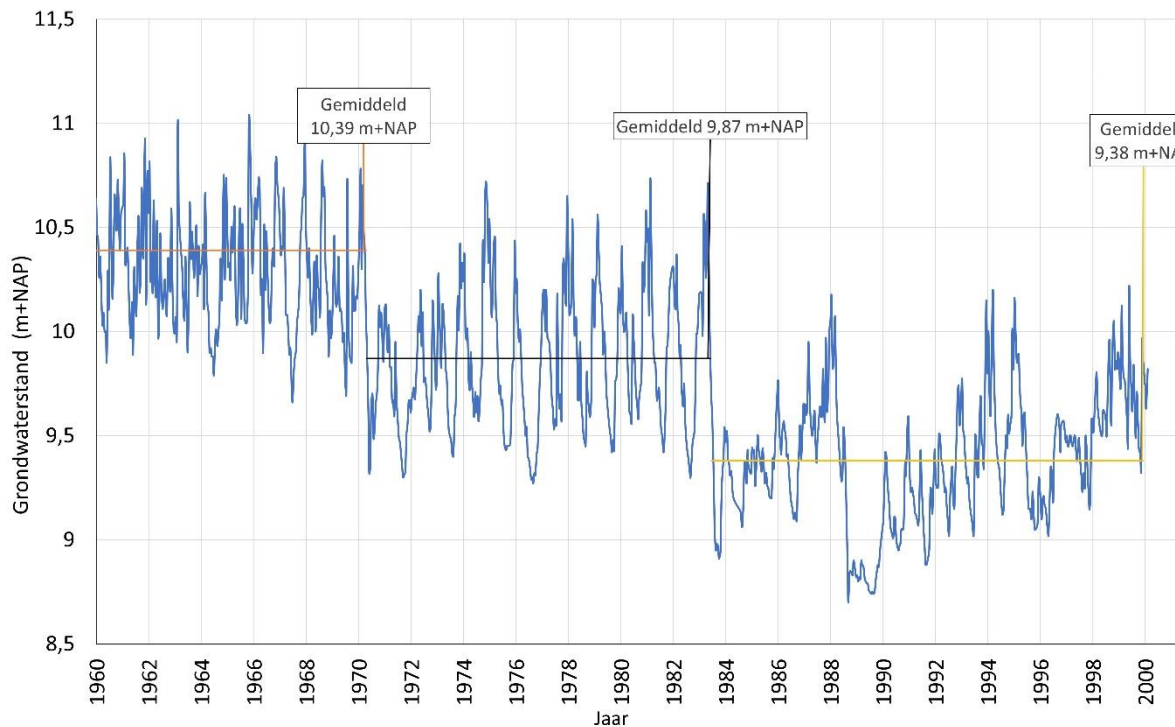
Een combinatie van beide maatregelen heeft mogelijk meer effect, zeker wanneer de waterbodem ook een (mogelijke) bron van ijzer is. Dit zou nog getest kunnen worden in bijvoorbeeld de vijver in Welgelegen. Daarnaast is het van belang dat er meer inzicht is in de kweldruk in de vijver. Wanneer deze (periodiek) zeer hoog is, zal ijzer alsnog het systeem in blijven komen en (op termijn) het oppervlaktewater weer roestbruin doen kleuren.

Hoewel de uitgevoerde pilot niet heeft geleid tot een blijvende verandering van de roestbruine kleur van de vijvers, zijn er andere waardevolle inzichten aan het licht gekomen. Deze worden hieronder benoemd.

Peilbeheer en verdroging

De grote vijvers met relatief lage waterpeilen hebben in het verleden gezorgd voor goede condities om woningen te bouwen. Een aspect dat bij de aanleg onderbelicht bleef was de bijbehorende versnelde afvoer van grondwater, met als gevolg verdroging van de omgeving. De grondwaterstand daalde sterk ten tijde van de woningbouwfases (afbeelding 8). Door het gecontroleerde peilbeheer is de

sponswerking van het natuurlijke systeem verloren gegaan. Klimaatverandering en de droge zomers van de afgelopen jaren brengen deze problematiek opnieuw onder de aandacht.



Afbeelding 8. Grondwaterstandsverloop (m+NAP) door de tijd. Hierin is de relatie met ontwikkeling van woonbuurt De Mheen in de wijk Zevenhuizen rond 1970 (1e fase) en 1983 (2e fase) te zien (peilbuis Abrikozenweg). Gemiddelde grondwaterstand van drie periodes is weergegeven met de gekleurde horizontale lijnen

Bij het opzetten van het peil in de vijvers is ook onderzocht of dit zou leiden tot grondwateroverlast in de omliggende huizen. Dit is niet geconstateerd. Uit de metingen blijkt dat het grondwater als gevolg van het opzetten van het peil minder ver uitzakt dan vóór de peilopzet. Op deze manier kan er gemakkelijk meer (grond)water vastgehouden worden. Met een hoger en natuurlijker waterpeil dat meebeweegt met de seizoenen, kan de verdroging worden tegengegaan en de sponswerking (deels) worden hersteld. Daarnaast neemt het wateroppervlak en daarmee de belevingswaarde van de vijvers bij hogere waterpeilen toe.

Waarden van kleuring

Door uitgebreid onderzoek te doen naar de vijvers is ook steeds meer het besef ontstaan dat het fenomeen bruinkleuring door ijzerrijke kwel hoort bij het natuurlijk watersysteem. Het aantreffen van bijzondere kwelvegetatie in de vorm van duizendknoopfonteinkruid in de vijvers in Apeldoorn onderstreept dit. Dit besef past binnen een veranderende tijdsgeest, ook in het stedelijk waterbeheer. Waar eerst de nadruk lag op onder andere ontwatering en het verminderen van overstorten, worden nu ook zaken als de belevingswaarde van water en klimaatadaptatie belangrijker. De bodem en het watersysteem worden in toenemende mate sturend. Herstel van en aansluiten bij natuurlijke processen in het bodem- en watersysteem worden daarmee logische werkwijzen. Het Apeldoornse fenomeen van de bruine vijvers krijgt hiermee meer en meer waardering.

Referenties

1. Smolders, F., Mullekom, M. van, Swinkels, C. & Poelen, M. (2016). *Onderzoek naar de roodkleuring van vijvers in Apeldoorn*. Rapportnr. 2016.29. Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen.
2. Geurts, J.J.M. et al. (2010). 'The interaction between decomposition, N and P mineralization and their mobilization to the surface water in fens'. *Water Research* 44: 3487-3495.